

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DETERMINAÇÃO DE SOLUÇÕES CORRETIVAS
NA OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS
ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE PROJEÇÃO ORTOGONAL

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA
ELÉTRICA

JÉFERSON MENEGUIN ORTEGA

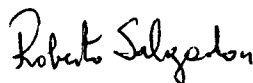
FLORIANÓPOLIS, SETEMBRO DE 1991.

DETERMINAÇÃO DE SOLUÇÕES CORRETIVAS
NA OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS
ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE PROJEÇÃO ORTOGONAL

JEFERSON MENEQUIN ORTEGA

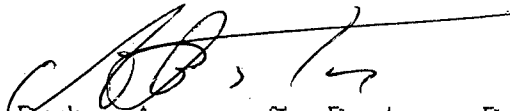
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA ELÉTRICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO SISTEMAS
DE POTÊNCIA, E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO



Prof. Roberto Salgado, PhD

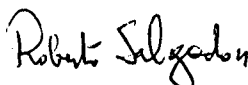
Orientador



Prof. João Pedro Assumpção Bastos, Dr. D'Etat

Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

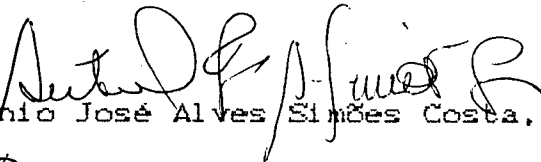
BANCA EXAMINADORA



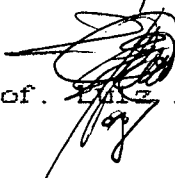
Prof. Roberto Salgado, PhD



Prof. Hans Helmut Zürn, PhD



Prof. Antonio José Alves Simões Costa, PhD



Prof. Jairo Branco Machado, D. Ing.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me deu saúde, oportunidades e disposição para o trabalho.

Aos meus pais e irmãos pelo apoio e compreensão.

Ao prof. Roberto de Souza Salgado pela orientação, apoio e amizade demonstrados no decorrer deste trabalho.

A todos os professores, colegas e funcionários do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e do Laboratório de Sistema de Potência (LABSPOT), que de alguma forma contribuíram para o enriquecimento deste trabalho.

À UFSC e à CAPES pelo apoio financeiro que permitiu a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO	iv
ABSTRACT	v
CAPÍTULO 1 - Introdução	
1.1 - Aspectos Gerais.....	01
1.2 - Revisão Bibliográfica.....	02
1.3 - Organização do Trabalho.....	05
CAPÍTULO 2 - Formulação do Problema	
2.1 - Introdução.....	07
2.2 - Formulação do Problema.....	07
2.3 - Determinação da Solução de Mínima Norma.....	10
2.3.1 - Projeção Ortogonal.....	11
2.3.2 - Sistema Sobredeterminado.....	13
2.3.3 - Análise da Solução Fornecida pela Projeção Ortogonal.....	14
2.3.4 - Detecção de Solução Inviável.....	16
2.3.5 - Fatores de Ponderação.....	18
2.4 - Transformação Ortogonal.....	20
2.5 - Conclusão.....	23
CAPÍTULO 03 - Modelagem em Termos do Sistema Elétrico	
3.1 - Variáveis de Controle.....	25
3.2 - Função Objetivo.....	26

3.3 - Modelagem das Restrições.....	27
3.3.1 - Restrições de Igualdade.....	34
3.3.2 - Restrições de Desigualdade.....	36
3.4 - Algoritmo.....	38
3.5 - Considerações sobre a Formulação.....	41
3.6 - Conclusões.....	44

CAPÍTULO 04 - Resultados Numéricos

4.1 - Considerações Gerais.....	45
4.2 - Comparação Quanto ao Grupo de Variável.....	46
4.3 - Influência da Ponderação no Processo de Convergência....	50
4.4 - Resultados Gerais dos Sistema Propostos.....	53
4.4.1 - Tensões em Barra de Geração como Variável de Controle .	53
4.4.2 - Inclusão dos Taps como Variáveis de Controle.....	56
4.5 - Comparação com Outros Métodos.....	61
4.5.1 - Uso da Geração de Potência Reativa como Variável de Controle.....	62
4.5.2 - Uso de Técnicas de Programação Linear.....	63
4.6 - Conclusões.....	65

CAPÍTULO 05 - Conclusões

Conclusões Gerais.....	67
Trabalhos Futuros.....	70

BIBLIOGRAFIA.....	71
-------------------	----

Apêndice A - Rotações de Givens.....	75
Apêndice B - Formulação Alternativa para o Despacho de Potência Reativa....	78
Apêndice C - Dados do Sistema de 06 Barras.....	82

ABSTRACT

This work presents an algorithm based on Orthogonal Projection Techniques, whose objective is the elimination of bus voltage magnitude violations. It is aimed to find the minimal changes in selected controls of the power network, so that the limits on those variables are observed.

The problem is modelled as a sequence of underdetermined linear systems or, in case of infeasible solutions, an overdetermined set of linear equations. Each subproblem of this sequence is alternated with the solution of the nonlinear equations which represent the power system. Sensitivity matrices based on the linearized power flow equations as well as weighting factors are used. The latter are employed to emphasize or inhibit, if necessary, the influence of certain control variables in the optimisation process.

With the aim of assessing the performance of the proposed technique in terms of accuracy, speed and reliability, numerical results are presented.

RESUMO

Na operação de um sistema de potência, podem ocorrer eventos que o conduzam a um estado onde existam violações nos limites de tensão das barras e/ou fluxos de potência nas linhas de transmissão. Nestas situações, o operador deve exercer ações de controle corretivo, as quais consistem em ajustes nas variáveis de controle adequadas para cada situação.

Este trabalho apresenta um algoritmo baseado no método de projeção ortogonal, cujo objetivo é a eliminação das violações nas magnitudes de tensão das barras do sistema. Busca-se determinar a mínima variação em determinados controles do sistema de potência, tal que os limites naquelas variáveis sejam observados.

O problema é formulado em termos da determinação da solução de uma seqüência de sistemas de equações lineares subdeterminado ou, se para estes não existir solução viável, sobredeterminado. A solução de cada subproblema desta seqüência é alternada com a solução das equações não lineares que representam a rede elétrica. São utilizadas matrizes de sensibilidade derivadas das equações linearizadas do fluxo de potência AC, e fatores de ponderação. Tais fatores são necessários para enfatizar ou inibir, quando necessário, a influência de certas variáveis de controle no processo de convergência.

Resultados numéricos são apresentados para avaliar o desempenho da técnica proposta em termos de precisão, rapidez e confiabilidade para aplicação na operação de sistemas de potência.

CAPÍTULO 01 - INTRODUÇÃO

1 - ASPECTOS GERAIS

O principal objetivo da operação de um sistema de potência é o suprimento do seu mercado de energia elétrica, em obediência à trilogia de continuidade, qualidade e economicidade do serviço, ou seja, a obtenção de um alto índice de desempenho na sua função específica, através de um número menor de interrupções, manutenção de adequados níveis de tensão e frequência e o atendimento da carga com custo incremental global mínimo [35].

Durante sua operação, um Sistema de Potência (SP) experimenta variações de carga, interrupções nas linhas de transmissão (LT's), trafos e geradores, etc ..., eventos que podem levá-lo a um estado onde existam violações nos limites de tensão das barras de carga e/ou fluxos de potência nas LT's. A necessidade de correção destas violações se deve aos seguintes fatores :

- Durante a ocorrência de sub-tensões, o sistema fica sujeito a aumento das perdas na linha de transmissão, e portanto diminuição da potência ativa transmitida;
- Durante a ocorrência de sobre-tensões, pode ocorrer danificação de equipamentos do sistema por perda de isolamento;
- Durante a ocorrência de sobre-cargas nas LT's, o sistema sofre elevação das perdas de potência ativa, diminuição do nível das tensões nas barras e diminuição da confiabilidade do sistema, no que tange à continuidade de serviço, devido à possibilidade de desligamento em cascata.

Diante destes fatos o operador deve exercer ações de controle

Diante destes fatos o operador deve exercer ações de controle corretivo, as quais consistem em ajustes das variáveis de controle de potência reativa (posicionamento de "taps" dos transformadores, tensão terminal dos geradores e chaveamento de fonte de potência reativa "shunt") no caso de sub-tensões ou sobre-tensões, e de redespacho de geração de potência ativa, mudança da topologia da rede e, se necessário, uso de chaveamento de cargas no caso de sobrecarga de potência ativa na transmissão de energia.

O problema de controle de tensão e potência reativa em Sistemas de Potência está diretamente relacionado não somente com a qualidade de serviço para suprir a demanda, mas também com a segurança e/ou economia da operação do SP. Este tipo de controle se faz necessário para manter adequados perfis de tensão do sistema, fluxo de potência nas linhas de interligação e para monitorar a circulação de potência reativa indesejável [09].

1.2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Dois procedimentos podem ser aplicados para corrigir possíveis violações nos limites de tensão e potência reativa. O primeiro consiste na execução de um programa de fluxo de potência repetidas vezes até que as violações sejam eliminadas. Para a configuração do sistema elétrico correspondente às violações, diferentes distribuições nas gerações de potência ativa e reativa são selecionadas, com o objetivo de que a magnitude das tensões e/ou fluxos de potência nas linhas de transmissão alcancem níveis aceitáveis. Este procedimento iterativo, constitui um processo de tentativa e erro, e é baseado na experiência do operador que seleciona os ajustes a serem efetuados nos dispositivos de controle de potência (geração, condensadores

síncronos, bancos de capacitores ou reatores, transformadores com comutação sob carga, etc...). Embora através desse método seja possível obter níveis de tensão e fluxos de potência razoáveis, o problema de eliminar violações nem sempre é resolvido satisfatoriamente sob o ponto de vista global do controle de potência, já que as modificações nos controles são determinadas com base na atuação individual e não na operação conjunta dos equipamentos destinados àquela finalidade. Por outro lado, o processo tentativa-erro pode consumir muito tempo até que se determine uma solução satisfatória e não há garantias suficientes para afirmar que tal solução não existe, quando fôr o caso.

O segundo procedimento consiste em formular a eliminação de violações como um problema de otimização, no qual busca-se determinar o mínimo valor para a somatória dos desvios de uma distribuição de potência reativa pré-especificada. Neste caso, é possível usar técnicas de Programação Linear, tal que a busca é efetuada, não na base do procedimento tentativa-erro mencionado anteriormente, mas de uma forma direcionada, que permite rapidamente a obtenção de soluções aceitáveis ou a constatação de que estas não existem para as condições consideradas.

Nos últimos anos tem sido dada uma atenção crescente para o controle de potência reativa e tensão na operação de sistemas de potência. Diferentes métodos para o controle de tensão / potência reativa têm sido propostos, os quais empregam variadas técnicas de otimização para resolver o problema. Algumas das principais abordagens são comentadas a seguir.

Farghal, Elela e Aziz [25] desenvolveram um método para controle de potência reativa / tensão em tempo real, baseado no uso de um modelo linearizado das equações do fluxo de potência convencional na forma cartesiana. O processo de otimização é não iterativo, e dá ênfase ao despacho

ótimo de potência reativa durante as condições normais ou emergência.

Ilic e Stobart [19] propõem um método para controle de tensão baseado na monitoração dos desbalanços de potência reativa através de uma análise não - linear das equações do fluxo de potência.

Edwin e Lemmer [26], desenvolveram uma técnica baseada em programação quadrática para o controle tensão / potência reativa. São utilizadas matrizes de sensibilidade as quais relacionam linearmente as variáveis de controle e de estado. Os "taps" são utilizados como variáveis de controle alternativos.

Chang e Hsu [14], propõe um método baseado em um fluxo de potência AC linearizado para eliminação de sobrecargas e violações de tensão no sistema. Também fazem uso de matrizes de sensibilidade de primeira ordem, obtidas diretamente do modelo de fluxo de potência desacoplado rápido.

Farach e Grady [13], utilizam um procedimento baseado nas equações linearizadas do fluxo de potência convencional, para controle de tensão "on-line" através da Programação Linear (PL), sendo o perfil de tensão controlado essencialmente pela geração de potência reativa.

Chang, Marks e Kato [21], apresentam um método baseado em programação linear para eliminação de violações, se possível. Em caso contrário, quando nenhum redespacho de controle viável pode ser encontrado, o processo é direcionado para o cálculo das ações de controle que minimizem as violações.

Salgado [01], propõe uma técnica baseada em linearizações sucessivas para eliminação de violações nas magnitudes de tensão das barras de carga do sistema elétrico. O método é baseado em Projeções Ortogonais (PO) e um fluxo de potência AC é executado para confirmar a solução das equações

não-lineares que representam o sistema de potência. Este processo é iterativo, sendo que o algoritmo de projeção ortogonal e o fluxo de potência AC são executados sucessivamente até que não mais existam violações nas magnitudes de tensão das barras do sistema, ou uma situação de inviabilidade completa seja detectada.

1.3 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Dentro deste panorama, este trabalho tem como objetivo propor um algoritmo alternativo, para a determinação das ações de controle, a serem tomadas pelo operador do sistema elétrico de modo a corrigir violações nos níveis de tensão das barras de carga.

O problema é formulado em termos da solução de uma seqüência de sistemas lineares subdeterminados, ou, se não existir solução para estes, sobredeterminados. A solução de cada um destes subproblemas é alternada com a solução das equações não-lineares que representam a rede elétrica, tal que, ao final do processo, os balanços de potência ativa e reativa são satisfeitos e as violações nos limites da magnitude das tensões nodais são eliminadas (ou minimizadas). As equações que compõem os sistemas lineares são obtidos através de relações de sensibilidade, utilizando resultados das soluções das equações não-lineares mencionadas. O trabalho é organizado da forma descrita a seguir.

O capítulo 02 trata da modelagem matemática do método de projeção ortogonal e da análise da solução de mínima norma. São apresentadas as diferenças de formulação quanto à função-objetivo, entre o método de Programação Linear, utilizado nas referências [2, 3, 4, 7, 8, 9, 15, 22, 23] e

de uma solução inviável no processo de otimização. Finalmente são introduzidos os conceitos básicos para o uso de fatores de ponderação, com o intuito de mostrar a influência de determinadas variáveis de controle no processo de convergência, e do uso de matrizes ortogonais para um melhor condicionamento numérico da técnica de projeção ortogonal proposta.

No capítulo 03 é descrita a modelagem do problema de determinação de soluções corretivas em termos de variáveis de controle alternativas do sistema elétrico. Apresenta-se uma forma de uso das matrizes de sensibilidade para relacionar as variáveis de controle e dependentes. Também são desenvolvidas as expressões analíticas que representam as restrições de igualdade e de desigualdade. Ainda neste capítulo é apresentado o algoritmo baseado nos conceitos apresentados no capítulo anterior, em termos das variáveis do sistema elétrico.

Os resultados numéricos da implementação computacional da técnica proposta, obtidos para sistemas de diferentes portes, são apresentados no capítulo 04. Também são feitas comparações entre diferentes implementações quanto à seleção das variáveis de controle, utilizando o método de projeção ortogonal. Finalmente são apresentadas comparações com o método de programação linear em termos de precisão das soluções obtidas.

As principais conclusões deste trabalho se encontram no capítulo 05, onde também são sintetizadas suas contribuições bem como o desempenho da metodologia proposta.

CAPITULO 02 - FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

2.1 - INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a base teórica da técnica de projeção ortogonal utilizada neste trabalho. Dentre os principais aspectos abordados, encontra-se a análise das soluções obtidas para sistemas lineares subdeterminados e sobredeterminados, o uso de fatores de ponderação de forma a fornecer o deslocamento de certas variáveis e restringir o de outras, a detecção da condição onde não existe solução viável, e o uso de matrizes ortogonais para a melhoria da característica numérica da metodologia proposta.

2.2 - FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Para corrigir violações nas magnitudes de tensão, são propostas na literatura técnicas nas quais o sistema de potência pode ser representado através de um modelo linearizado, constituindo um problema linear, o qual pode ser resolvido através de métodos de Programação Linear [3,4,6,7,8,12,13,17,18] ou Mínimos Quadrados [01,14].

Os métodos baseados em programação linear formulam a busca de soluções corretivas como uma sequência de problemas de otimização. A solução de cada um destes problemas é obtida visando a minimização da somatória dos valores absolutos dos desvios nas variáveis de otimização, sujeita às restrições linearizadas representando as equações da rede elétrica, para um dado ponto de operação, e aos limites físicos dos equipamentos do sistema e/ou

restrições de segurança do sistema. Um grande número de metodologias utilizando programação linear tem sido proposto na literatura, sendo, em termos de algoritmo computacional, o método Dual Simplex um dos mais referidos pela literatura. As principais vantagens da aplicação de técnicas de programação linear são : confiabilidade, rapidez na detecção de inviabilidades, facilidade de implementação, velocidade de solução e facilidade de incorporar as restrições de segurança.

O método baseado em técnicas ortogonais, proposto neste trabalho como uma alternativa às formulações baseadas em Programação Linear, visa corrigir as violações nos limites de magnitude das tensões do sistema elétrico, buscando a projeção ortogonal da solução inviável, sob o ponto de vista da operação do sistema de potência, sobre um sub-espço delimitado pelas restrições que definem a região viável. Em termos de variáveis do sistema elétrico, isto significa determinar a mínima variação em controles selecionados do sistema de potência (magnitude de tensão de barras de geração, posicionamento de "taps" dos transformadores, etc) tal que os limites nas variáveis dependentes (módulo das tensões nas barras PQ, fluxos nas LT's, etc) sejam observados.

Matematicamente, isto pode ser representado como a determinação da solução de mínima norma Euclidiana de um sistema sub-determinado ou sobre-determinado de equações lineares, correspondendo às restrições violadas [01,14]. Em termos analíticos, isto é expresso como a solução do sistema linear

$$N * \Delta Y = d \quad (2.1)$$

onde :

\underline{N} : é a matriz ($r \times m$) de coeficientes de restrições ativas (restrições de igualdade, no ponto considerado) com $\{ \underline{n}_1^T, \dots, \underline{n}_r^T \}$ linhas linearmente independentes, sendo $m \geq r$,

$\underline{\Delta Y}$: é o vetor ($m \times 1$) das variáveis de otimização, e

\underline{d} : é o vetor ($r \times 1$) do lado direito do sistema linear.

A diferença entre as formulações utilizadas pelos algoritmos baseados em Programação Linear e Projeção Ortogonal pode ser observada na Tabela 2.1 abaixo, na qual \underline{y}_0 representa uma solução inviável no ponto de linearização :

TAB. 2.1 - DIFERENÇA DE FORMULAÇÃO DOS ALGORITMOS BASEADOS EM PROGRAMAÇÃO LINEAR E PROJEÇÃO ORTOGONAL

Mét. de Prog. Linear	Mét. de Proj. Ortog.
MINIMIZAR $\sum \Delta Y_i $	MIN. $ \Delta Y ^2 = (\sum \Delta Y_i^2)$
S.A. : $N \times \underline{\Delta Y} = \underline{b}$	S.A : $N \times \underline{\Delta Y} = \underline{b}$
$\underline{b} = \underline{d} - N \times \underline{y}_0$	$\underline{b} = \underline{d} - N \times \underline{y}_0$

Deve-se observar que a matriz de restrições N , apresentada na Tabela 2.1, não é necessariamente a mesma para as diferentes metodologias propostas na literatura. No caso da técnica apresentada neste trabalho, N representa os coeficientes das restrições que se tornaram ativas num dado ponto de operação e, portanto, tem dimensão variável ao longo do processo.

Conforme será visto no capítulo seguinte, esta matriz é "cheia", porém sempre de dimensão reduzida. No caso de métodos baseados em programação linear, a matriz N pode ser formada de diversas maneiras, de acordo com as conveniências da formulação, como mostram as referências previamente mencionadas. Por exemplo, para a referência [17], a matriz N é composta inicialmente pelas restrições correspondentes a todas as variáveis de controle, sejam restrições de igualdade ou de desigualdade. Embora isto resulte em maior dimensão para a matriz de restrições, esta é esparsa, o que fornece ao algoritmo boa característica em termos de rapidez e requisitos de memória.

2.3 - DETERMINAÇÃO DA SOLUÇÃO DE MÍNIMA NORMA [01,23,25]

Seja \underline{y}_0 uma solução inicial inviável, onde pelo menos uma restrição seja violada, isto é,

$$N * \underline{y}_0 \leq \underline{d} \quad (2.2)$$

O problema a ser resolvido consiste em encontrar o incremento Δy de maneira que

$$\underline{y}_1 = \underline{y}_0 + \Delta \underline{y} \quad (2.3)$$

seja uma solução viável. Isto significa que,

$$N * \underline{y}_1 = N * \underline{y}_0 + N * \Delta \underline{y} = \underline{d} \quad (2.4)$$

ou, alternativamente,

$$\underline{N} * \underline{\Delta y} = (\underline{d} - \underline{N} * \underline{y}_0) \quad (2.5)$$

2.3.1 - PROJEÇÃO ORTOGONAL

Analisando a equação (2.5), observa-se que

- 1.) $\underline{n}_i * \underline{\Delta y} = 0$, para cada restrição satisfeita.
- 2.) $\underline{n}_i * \underline{\Delta y} = (\underline{d}_i - \underline{n}_i * \underline{y}_0)$, para cada restrição violada

Da primeira afirmativa, pode-se observar que $\underline{\Delta y}$ é ortogonal aos hiper-planos definidos pelas restrições satisfeitas. Em outras palavras, $\underline{\Delta y}$ pertence ao espaço nulo da sub-matriz correspondente a tais restrições. A segunda afirmativa implica que $\underline{\Delta y}$ pertence à interseção dos hiper-planos $\underline{n}_i * \underline{\Delta y} = (\underline{d}_i - \underline{n}_i * \underline{y}_0)$, onde i corresponde às restrições violadas. Pode-se concluir, portanto, que o vetor $\underline{\Delta y}$ pertence ao sub-espaço formado pelas linhas da matriz \underline{N} e, por conseguinte, pode ser expresso como uma combinação das linhas de \underline{N} , ou seja

$$\underline{\Delta y} = \underline{N}^T * \underline{z} \quad (2.6)$$

onde \underline{z} é um vetor arbitrário ($r \times 1$).

Substituindo a equação (2.6) na equação (2.4), obtém-se:

$$\underline{N} * \underline{y}_0 + \underline{N} * \underline{N}^T * \underline{z} = \underline{d}$$

Logo

$$\underline{z} = (\underline{N} * \underline{N}^T)^{-1} * (\underline{d} - \underline{N} * \underline{y}_0)$$

e portanto,

$$\underline{\Delta y} = \underline{N}^T * (\underline{N} * \underline{N}^T)^{-1} * (\underline{d} - \underline{N} * \underline{y}_0) \quad (2.7)$$

A solução $\underline{y}_1 = \underline{y}_0 + \underline{\Delta y}$, pode agora ser expressa como,

$$\underline{y}_1 = \underline{y}_0 + \left[\underline{N}^T * (\underline{N} * \underline{N}^T)^{-1} * (\underline{d} - \underline{N} * \underline{y}_0) \right]$$

a qual pode ser reescrita como

$$\underline{y}_1 = \left[\underline{I} - \underline{N}^T * (\underline{N} * \underline{N}^T)^{-1} * \underline{N} \right] * \underline{y}_0 + \underline{N}^T * (\underline{N} * \underline{N}^T)^{-1} * \underline{d} \quad (2.8)$$

A análise das equações (2.7) e (2.8) mostram que \underline{y}_1 é uma solução viável. Isto pode ser facilmente verificado pré-multiplicando-se ambos os lados da equação (2.7) por \underline{N} . Se $\underline{d} = 0$, isto é, se os hiper-planos que definem a região viável contêm a origem, $\underline{\Delta y}$ é dado por,

$$\underline{\Delta y} = \left[- \underline{N}^T * (\underline{N} * \underline{N}^T)^{-1} * \underline{N} \right] * \underline{y}_0$$

e pode ser identificado como a projeção de \underline{y}_0 sobre o sub-espço definido pelas linhas da matriz de restrições \underline{N} , de acordo com a interpretação da matriz $\underline{P}_{qr} = [\underline{N}^T * (\underline{N} * \underline{N}^T)^{-1} * \underline{N}]$ dada pela referência [23].

2.3.2 - SISTEMA SOBREDETERMINADO

Para o caso de um sistema linear sobredeterminado, isto é, com número de restrições de igualdade maior do que o número de variáveis de otimização, a solução fornecida pelo método de Projeção Ortogonal é modificada para [14,25],

$$\underline{\Delta y} = (\underline{N}^T \times \underline{N})^{-1} \times \underline{N}^T \times (\underline{d} - \underline{N} \times \underline{y}_0) \quad (2.9)$$

onde, $(\underline{N}^T \times \underline{N})^{-1} \times \underline{N}^T$ é a matriz pseudo-inversa da matriz \underline{N} do sistema linear sobredeterminado [25].

Deve ser observado, que $\underline{\Delta y}$ da equação acima é a solução que minimiza a norma Euclidiana do vetor $(\underline{N} * \underline{y} - \underline{d})$ [25]. Para mostrar isto, seja o seguinte problema de otimização sem restrições,

$$\text{Minimize } J = (\underline{N} * \underline{\Delta Y} - \underline{d})^T * (\underline{N} * \underline{\Delta Y} - \underline{d})$$

A solução deste problema é obtida derivando-se a função objetivo em relação a $\underline{\Delta Y}$ e igualando o resultado a zero. Isto fornece,

$$\frac{\partial J}{\partial \underline{Y}} = 2 * \underline{N}^T * (\underline{N} * \underline{\Delta Y} - \underline{d}) = 0$$

e, já que posto $(N) = m$, $(N^T * N)$ é não singular e

$$\Delta \underline{Y} = (N^T * N)^{-1} * N^T * \underline{d}$$

o que demonstra a assertiva feita sobre a interpretação da solução do sistema linear sobredeterminado.

2.3.3 - ANÁLISE DA SOLUÇÃO FORNECIDA PELA PROJEÇÃO ORTOGONAL

Quando o sistema é sub-determinado, ou seja, no caso em que o número de restrições ativas é menor que o número de variáveis de controle, a equação (2.7) representa a solução de Mínima Norma Euclidiana para o Sistema Linear $N * \Delta \underline{y} = (\underline{d} - N * \underline{y}_0)$.

Isto pode ser observado considerando a condição de mínimo global, [31]. Esta condição determina que $\Delta \underline{y}$ é o incremento de mínima norma, se e somente se,

$$P_{pr} * \nabla \underline{Y} = 0 \quad (2.10)$$

onde,

$P_{pr} = [I - N^T * (N * N^T)^{-1} * N]$, chamada Matriz de Projeção Ortogonal [23], é a matriz que projeta qualquer vetor do espaço Euclidiano m-dimensional sobre o espaço nulo da matriz N, que representa as restrições de igualdade, $\nabla \underline{Y}$ é o gradiente da função objetivo.

Para uma melhor compreensão do resultado fornecido pela projeção ortogonal, deve ser observado que o problema da determinação da solução de mínima norma sujeito a um conjunto de restrições de igualdade lineares pode ser expresso como,

$$\begin{aligned} \text{Min. } & \underline{\Delta y}^T * \underline{\Delta y} \\ \text{s.a. } & \underline{N} * \underline{\Delta y} = \underline{d} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Desta maneira, a equação (2.10) pode agora ser expressa como,

$$[\underline{I} - \underline{N}^T * (\underline{N} * \underline{N}^T)^{-1} * \underline{N}] * 2 * \underline{\Delta y} = 0$$

cujo rearranjo fornece :

$$2 * \underline{\Delta y} - 2 * \underline{N}^T * (\underline{N} * \underline{N}^T)^{-1} * \underline{N} * \underline{\Delta y} = 0$$

e

$$2 * \underline{\Delta y} = 2 * \underline{N}^T * (\underline{N} * \underline{N}^T)^{-1} * \underline{N} * \underline{\Delta y}$$

De acordo com a equação (2.5), $\underline{N} * \underline{\Delta y} = (\underline{d} - \underline{N} * \underline{y}_0)$. Logo,

$$\underline{\Delta y} = \underline{N}^T * (\underline{N} * \underline{N}^T)^{-1} * (\underline{d} - \underline{N} * \underline{y}_0)$$

Este incremento é igual àquele obtido pelas considerações de projeção ortogonal (equação 2.7) e corresponde à solução de mínima norma, ou seja, de mínima mudança nas variáveis de controle $\underline{\Delta y}$.

2.3.4 - DETECÇÃO DE SOLUÇÃO INVIÁVEL

Os sistemas lineares, cuja solução foi mostrada nas seções anteriores, correspondem a uma parte do problema global a ser resolvido. Este é obtido adicionando-se às restrições de igualdade, um conjunto de restrições de desigualdade, levado em consideração num estágio posterior ao da obtenção da solução do problema expresso pela equação (2.11).

Durante o processo para a determinação da solução de mínima norma Euclidiana, algumas restrições de desigualdade podem se tornar ativas, ou seja, podem atingir seus limites. É possível que algumas destas restrições, que necessitem ser incluídas na matriz de restrições de igualdade, sejam linearmente dependentes, isto é, sejam uma combinação linear das demais restrições que compõem a matriz N . Desta maneira, a adição de uma nova restrição linearmente dependente (\underline{n}_{r+1}) na matriz N , representaria uma redundância em termos das equações que compõem a mesma. Isto poderia resultar num caso em que a adição desta nova restrição \underline{n}_{r+1} conduziria a uma condição de singularidade na matriz $(N * N^T)^{-1}$, já que o método de projeção ortogonal no caso do sistema linear subdeterminado pressupõe assegurada a independência linear entre as restrições que compõem a matriz de restrições de igualdade. Desta maneira, com o intuito de se observar a independência linear entre os vetores que representam as restrições e, eventualmente detectar uma condição de inviabilidade completa na obtenção de soluções, a cada nova restrição \underline{n}_{r+1} a ser adicionada deve ser efetuado o seguinte procedimento :

1.) Verificar a dependência linear entre \underline{n}_{r+1} e as restrições previamente adicionadas na matriz N, com base no teorema apresentado pela referência [23]. Este teorema garante que " \underline{n}_{r+1} será linearmente independente de N se a projeção ortogonal do vetor, que representa a nova restrição no espaço nulo da matriz correspondente às restrições já existentes, é diferente de zero", isto é

$$P_{pr} * \underline{n}_{r+1} \neq 0$$

onde P_{pr} é a matriz de projeção ortogonal previamente definida na equação (2.10).

2.) Caso o vetor que representa a nova restrição seja linearmente dependente das linhas da matriz N, isto é, $P_{pr} * \underline{n}_{r+1} = 0$, calcular o vetor de escalares ($\underline{\lambda}$), cujos componentes correspondem às restrições ativas representadas por N, através da expressão

$$\underline{\lambda} = (N * N^T)^{-1} * N * \underline{n}_{r+1}$$

Se pelo menos um ou mais escalar λ_i for menor do que zero, deve-se excluir a restrição correspondente ao menor λ_i negativo e incluir em seu lugar, a nova restrição \underline{n}_{r+1} .

Se todos os escalares λ_i forem maiores do que zero, isto é, se $P_{pr} * \underline{n}_{r+1} = 0$ e $\lambda_i > 0$, $\forall i$, pode ser provado [23] que é detectada uma

condição de inviabilidade completa, ou seja, nenhum passo é possível na direção definida por Δy levando-se em consideração a nova restrição, sem violar pelo menos uma das restrições ativas já incluídas na matriz N .

Quando nenhuma ação de controle corretivo pode ser encontrada de modo a levar o sistema a uma condição de operação viável, ainda assim é possível se calcular as ações de controle, as quais minimizam as restrições violadas [16]. Isto é feito através da solução de um sistema de equações lineares sobredeterminado, a qual é fornecida pela expressão (2.9).

2.3.5 - FATORES DE PONDERAÇÃO

Durante a solução de um problema de otimização, diferentes tipos de variáveis de controle (por exemplo, magnitude de tensão de geração, taps dos transformadores, etc.) causam diferentes impactos sobre as características de convergência da solução. Em muitos casos, um determinado grupo de variáveis, tem um maior efeito na redução do valor da função objetivo do que outro grupo de variáveis de controle, e tende a levar rapidamente a função objetivo ao seu valor ótimo [24]. Sob este ponto de vista, com o intuito de se considerar os diferentes efeitos das variáveis de controle no processo de convergência, podem ser utilizados fatores de ponderação para estas variáveis.

Assim, seja W definido como uma matriz diagonal cujos termos são os fatores de ponderação das variáveis de controle, isto é,

$$W = \begin{bmatrix} W_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & W_2 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & W_3 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & W_i & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & W_m \end{bmatrix}$$

onde " m " é igual ao numero de variáveis de controle,

" W_i " é a ponderação dada a i-ésima variável de controle.

O problema de otimização representado pela equação (2.11), em termos das variáveis de controle ponderadas, pode ser expresso como,

$$\begin{aligned} \text{Minimizar} \quad & \Delta \underline{Y}^T * W * \Delta \underline{Y} \\ \text{s.a.} \quad & N * \Delta \underline{Y} = \underline{d} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Sendo W uma matriz diagonal com termos reais e positivos, é observado que $W = W^{1/2} * W^{1/2}$ e $W^T = W$. Portanto, a equação (2.12) pode ser re-escrita como,

$$\begin{aligned} \text{Min.} \quad & \Delta \underline{Y}^T * W^{T/2} * W^{1/2} * \Delta \underline{Y} = \text{Min.} \quad (W^{1/2} * \Delta \underline{Y})^T * (W^{1/2} * \Delta \underline{Y}) \\ \text{s.a.} \quad & N * \Delta \underline{Y} = \underline{d} \end{aligned} \quad (2.13)$$

onde $W^{T/2}$ representa $(W^{1/2})^T$

Fazendo $\underline{\Delta X} = W^{1/2} * \underline{\Delta Y}$, a expressão (2.13) pode ser expressa como,

$$\begin{aligned} \text{Min.} \quad & \underline{\Delta X}^T * \underline{\Delta X} \\ \text{s.a.} \quad & N * W^{-1/2} * \underline{\Delta X} = \underline{d} \Rightarrow M * \underline{\Delta X} = \underline{d} \end{aligned}$$

onde,

$$M = N * W^{-1/2} \quad (2.14)$$

Deve ser observado que, quando variáveis de controle ponderadas são utilizadas, a função objetivo do problema de otimização original, representada pela expressão (2.11), é modificada pela matriz de ponderação W , enquanto que as restrições de igualdade lineares permanecem as mesmas. Portanto, a despeito da mudança de variáveis ($\underline{\Delta Y} - \underline{\Delta X}$), a solução de mínima norma Euclidiana para o problema de otimização representado pela equação (2.12) pode ser obtida através da determinação dos incrementos em $\underline{\Delta X}$ pelo método de projeção ortogonal aplicado a equação (2.14) (a qual é semelhante a equação 2.11), sendo os incrementos nas variáveis de controle $\underline{\Delta Y}$ obtidos através da relação $\underline{\Delta Y} = W^{-1/2} * \underline{\Delta X}$.

2.4 - TRANSFORMAÇÃO ORTOGONAL

Conforme mostrado na equação (2.7), a projeção ortogonal envolve a avaliação das matrizes inversas da forma $(N * N^T)^{-1}$, as quais são sujeitas a problemas de instabilidade numérica se a matriz N não é bem condicionada [01]. Para evitar tais problemas, faz-se uso de operações, chamadas

transformações ortogonais, as quais são numericamente robustas e não deterioram o condicionamento numérico da matriz na qual são aplicadas. Estas são realizadas utilizando-se matrizes ortogonais, isto é, matrizes Q com a seguinte definição:

$$* Q^{-1} = Q^T$$

$$* Q * Q^T = Q^T * Q = I$$

onde I é definida como a matriz identidade de ordem $(m \times m)$.

Desta forma, seja a matriz ortogonal Q , definida de modo que,

$$Q * N^T = \begin{bmatrix} R \\ \Theta \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

onde,

Q é uma matriz ortogonal $(m \times m)$,

R é uma matriz triangular inferior $(r \times r)$,

Θ é uma matriz nula $((m - r) \times r)$.

Seja também a matriz ortogonal Q , particionada da seguinte forma,

$$Q = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

onde

Q_1 é uma sub-matriz $(r \times m)$

Q_2 é uma sub-matriz $((m - r) \times m)$

Varias transformações ortogonais podem ser usadas para resolver a equação (2.15), em particular as Reflexões de Householder e as Rotações de Givens [01,28].

Neste trabalho as Rotações de Givens foram utilizadas (ver Apêndice A), pela facilidade que esta técnica proporciona para a determinação das submatrizes Q_1 , Q_2 e R [30]. Para obter estas submatrizes aplicam-se as Rotações de Givens, representadas pela matriz ortogonal Q , na matriz aumentada $[N^T \mid I]$ da seguinte maneira,

$$Q * \left[\begin{array}{c|c} N^T & I \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c|c} R & Q_1 \\ \hline \Theta & Q_2 \end{array} \right] \quad (2.17)$$

De acordo com a equação (2.7), o incremento $\Delta \underline{y}$ de uma solução inviável \underline{y}_0 para uma solução viável \underline{y}_1 , com respeito ao conjunto de r restrições de igualdade lineares $N * \underline{y} = \underline{d}$, é dado por,

$$\Delta \underline{y} = N^T * (N * N^T)^{-1} * (\underline{d} - N * \underline{y}_0)$$

A modificação desta equação considerando a Transformação Ortogonal aplicada na matriz N pode ser feita, utilizando-se as equações (2.15 e 2.16). Isto fornece :

$$\Delta \underline{y} = Q^T * Q * N^T * (N * Q^T * Q * N^T)^{-1} * (\underline{d} - N * \underline{y}_0)$$

$$\Delta \underline{y} = \left[\begin{array}{c|c} Q_1^T & Q_2^T \end{array} \right] * \left[\begin{array}{c} R \\ \hline \Theta \end{array} \right] * \left\{ \left[\begin{array}{c|c} \tilde{R} & \tilde{\Theta} \end{array} \right] * \left[\begin{array}{c} R \\ \hline \Theta \end{array} \right] \right\}^{-1} * (\underline{d} - N * \underline{y}_0)$$

$$\Delta \underline{y} = \left[\begin{array}{c} Q_1^T * R \\ \hline \tilde{R} * R \end{array} \right] * \left[\begin{array}{c} \tilde{R} * R \\ \hline \tilde{R} * R \end{array} \right]^{-1} * (\underline{d} - N * \underline{y}_0)$$

e portanto

$$\underline{\Delta y} = Q_1^T * R^{-T} * (\underline{d} - N * \underline{y}_0) \quad (2.18)$$

De maneira análoga, a expressão de $\underline{\Delta y}$ para o caso em que o sistema de equações lineares é sobredeterminado é

$$\underline{\Delta y} = R^{-1} \cdot Q_1 * (\underline{d} - N * \underline{y}_0) \quad (2.19)$$

Esta forma alternativa para a avaliação de $\underline{\Delta y}$ evita, conforme desejado, o cálculo da matriz inversa $(N * N^T)^{-1}$.

2.5 - CONCLUSÃO

Neste capítulo foi apresentada a formulação do método de projeção ortogonal para a resolução do problema de otimização restrito por um sistema de equações lineares.

Em especial, foi mostrada a base teórica do método de projeção ortogonal, que determina soluções para este problema de otimização projetando ortogonalmente uma solução inviável sobre a região de soluções viáveis. Tal método envolve matrizes da forma $(N * N^T)^{-1}$, as quais são propensas a problemas de instabilidade numérica se N não é bem condicionada. Para evitar tal problema, faz-se uso de Transformações Ortogonais.

A solução de um sistema linear sub-determinado (ou sobre-determinado) pode ser obtida utilizando-se o conceito de projeção ortogonal (mínimos quadrados). Se restrições de desigualdade são consideradas, em adição às restrições de igualdade permanentes, como em geral é o caso, é necessário utilizar um critério de seleção tal que o sistema linear seja sempre composto por um sistema de equações lineares de posto completo. Este critério também pode indicar quando não é possível obter uma solução viável devido à existência de restrições conflitantes.

CAPITULO 03

MODELAGEM EM TERMOS DO SISTEMA ELÉTRICO

Este capítulo apresenta a modelagem das equações da rede elétrica para a aplicação do método de projeção ortogonal apresentado no capítulo 02. A modelagem do problema em termos das variáveis do sistema elétrico e a formulação analítica das restrições de igualdade e desigualdade são apresentados. É ainda mostrado neste capítulo, o algoritmo do método implementado neste trabalho.

3.1 - VARIÁVEIS DE CONTROLE

Em termos gerais, alguns dos controles disponíveis ao operador do sistema elétrico, quando da necessidade de ações de controle corretivo, podem ser relacionados como segue:

- Geração de Potência Ativa,
- Injeções de potência reativa gerada,
- Nível de tensão nas barras de tensão controlada,
- "Taps" de transformadores em fase,
- "Taps" de transformadores defasadores,
- Mudança da configuração do sistema,
- Fluxos de potência em elos D.C. e
- Corte de carga.

Deve-se observar que o controle de injeção reativa envolve o

controle de geradores, condensadores síncronos, chaveamento de bancos capacitores, variações nos taps transformadores com comutação sob carga, etc...

Devido à natureza do problema a ser resolvido e ao acoplamento existente entre a potência reativa e o módulo das tensões, as variáveis mais adequadas para exercer a função corretiva proposta são [2, 5, 6, 11, 12, 15, 16, 20, 22] :

- módulo das tensões nas barras de geração $\Rightarrow |V_G|$,
- potências reativas geradas $\Rightarrow Q_G$,
- taps dos transformadores com comutação sob carga,
- fontes de potência reativa.

Para corrigir as violações nas magnitudes de tensão, é proposta neste trabalho uma formulação tendo como variáveis de controle as tensões nas barras de geração e os taps dos transformadores em fase. Pode-se ainda ter como opções de variáveis de controle, o uso de cada uma destas variáveis independentemente.

3.2 - FUNÇÃO OBJETIVO

Conforme mostrado no Capítulo 02, o método de projeção ortogonal visa determinar a solução de mínima norma Euclidiana de um sistema linear dado pela equação (2.1). Devido à tendência deste método em distribuir o incremento entre as variáveis de controle, a função objetivo é formulada fazendo-se uso de fatores de ponderação com o intuito de se diferenciar a influência de

certas variáveis de controle no processo de convergência.

Seja $\Delta \underline{U}$ um vetor composto pelos incrementos nas variáveis de controle, isto é :

$$\Delta \underline{U} = \begin{bmatrix} \Delta \underline{V_G} \\ - \\ \Delta \underline{a} \end{bmatrix}$$

onde

$\Delta \underline{V_G}$ é o vetor de variações nas magnitudes das tensões de geração

$\Delta \underline{a}$ é o vetor de variações nos taps dos transformadores.

Expressando a função objetivo em termos das variáveis de controle ponderadas, obtêm-se que,

$$\begin{aligned} \text{Minimizar} \quad & \Delta \underline{U}^T * W * \Delta \underline{U} \\ \text{s.a.} \quad & N * \Delta \underline{U} = \underline{d} \end{aligned} \quad (3.1)$$

A resolução deste problema de otimização é idêntica à discutida no capítulo 02 para resolução do problema (2.12).

3.3 - MODELAGEM DAS RESTRIÇÕES

A modelagem das restrições de igualdade e desigualdade utilizadas neste trabalho requer o uso de relações de sensibilidade entre as variáveis de controle e dependentes, devido à necessidade de se estabelecer uma relação

linear entre as mesmas. Estas podem ser determinadas expandindo-se as equações não lineares do fluxo de potência $g_{LF}(\underline{u}, \underline{x})=0$ em série de Taylor, em uma vizinhança em torno da solução inicial $(\underline{u}^0, \underline{x}^0)$ [01]. Isto fornece,

$$g_{LF}(\underline{u}^0 + \Delta \underline{u}, \underline{x}^0 + \Delta \underline{x}) \approx g_{LF}(\underline{u}^0, \underline{x}^0) + \left. \frac{\partial g(\underline{u}, \underline{x})}{\partial \underline{x}} \right|_{\underline{u}_0, \underline{x}_0}^T \Delta \underline{x} + \left. \frac{\partial g(\underline{u}, \underline{x})}{\partial \underline{u}} \right|_{\underline{u}_0, \underline{x}_0}^T \Delta \underline{u}$$

Já que $(\underline{u}^0, \underline{x}^0)$ e $(\underline{u}^0 + \Delta \underline{u}, \underline{x}^0 + \Delta \underline{x})$ satisfazem as equações do fluxo de potência,

$$\left. \frac{\partial g(\underline{u}, \underline{x})}{\partial \underline{x}} \right|_{\underline{u}_0, \underline{x}_0}^T \Delta \underline{x} + \left. \frac{\partial g(\underline{u}, \underline{x})}{\partial \underline{u}} \right|_{\underline{u}_0, \underline{x}_0}^T \Delta \underline{u} \approx 0$$

e portanto :

$$\Delta \underline{X} = - \underbrace{\left[\frac{\partial g(\underline{u}^0, \underline{x}^0)}{\partial \underline{x}} \right]^{-1}}_{J_{LF}} \cdot \underbrace{\left[\frac{\partial g(\underline{u}^0, \underline{x}^0)}{\partial \underline{u}} \right]}_{S_A} \cdot \Delta \underline{u} \quad (3.2)$$

onde :

$\Delta \underline{X} = [\Delta \underline{\theta}_{PV} \quad \Delta \underline{\theta}_{PQ} \quad \Delta \underline{V}_{PQ}]^T$ pode ser identificado como o vetor de incrementos nas variáveis dependentes, onde $\Delta \underline{\theta}_{PV}$ e $\Delta \underline{\theta}_{PQ}$ são os incrementos nos ângulos das tensões das barras PV e PQ, respectivamente, e $\Delta \underline{V}_{PQ}$ são os incrementos correspondentes às magnitudes de tensão das barras de carga,

J_{LF} é a matriz jacobiana do Fluxo de Potência de ordem $[NJ \times NJ]$, que relaciona as injeções de potência das barras PV e PQ com as variáveis dependentes $\Delta \underline{X}$, onde NJ é igual ao número de barras PV mais duas vezes o número de barras PQ,

S_A é a matriz de sensibilidade, de ordem $(NJ \times NVC)$, que relaciona as injeções de potência das barras PV e PQ com as variáveis de controle $\Delta \underline{U}$, isto é,

$$S_A = \begin{bmatrix} SPV,vg & \vdots & SPV,a \\ SPQ,vg & \vdots & SPQ,a \\ RPQ,vg & \vdots & RPQ,a \end{bmatrix}$$

NVC = número de variáveis de controle.

onde :

- $SPV,vg = \partial P_{PV} / \partial V_g$ e $SPV,a = \partial P_{PV} / \partial a$ são as submatrizes de derivadas de potência ativa das barras PV com respeito às magnitudes de tensão das barras de geração e aos taps dos transformadores, respectivamente.
- $SPQ,vg = \partial P_{PQ} / \partial V_g$ e $SPQ,a = \partial P_{PQ} / \partial a$ são as submatrizes de derivadas de potência ativa das barras PQ com respeito às magnitudes de tensão das barras de geração e aos taps dos transformadores, respectivamente.
- $RPQ,vg = \partial Q_{PQ} / \partial V_g$ e $RPQ,a = \partial Q_{PQ} / \partial a$ são as submatrizes de derivadas de potência reativa das barras PQ com respeito às magnitudes de tensão das barras de geração e aos taps dos trafos,

respectivamente.

A precisão do modelo linear baseado nas matrizes de sensibilidade que estima os incrementos nas variáveis dependentes, é inversamente proporcional aos incrementos nas variáveis de controle, ou seja, quanto menores os incrementos nas variáveis de controle, mais o valor estimado para as variáveis dependentes se aproxima do valor real [17].

Através do uso de matrizes de sensibilidade, são obtidos na forma linearizada os incrementos para a(s):

- Magnitudes de Tensão das Barras de Carga
- Potência Reativa das Barras de Geração
- Potência Ativa da Barra de Folga

com relação às variáveis de controle ($\Delta \underline{U}$).

◦ MAGNITUDES DE TENSÃO DAS BARRAS DE CARGA

Os incrementos nas variáveis dependentes resultam de variações nas variáveis de controle, as quais foram definidas anteriormente como sendo $|\underline{V}_G|$ e os taps. Esta relação entre as variáveis de controle e as variáveis dependentes pode ser expressa matematicamente utilizando-se a equação (3.2), isto é,

$$\begin{bmatrix} \Delta \underline{\Theta}_{PV} \\ \dots \\ \Delta \underline{\Theta}_{PQ} \\ \dots \\ \Delta \underline{V}_{PQ} \end{bmatrix} = - \underbrace{J_{LF}^{-1} \times S_A}_{\downarrow \underline{S}_{VPQ}} \times \begin{bmatrix} \Delta \underline{V}_G \\ \dots \\ \Delta \underline{a} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

onde

J_{LF} é a matriz jacobiana do fluxo de potência,

S_A é a matriz de sensibilidade das injeções de potência das barras PV e PQ com relação às variáveis de controle,

S_{VPQ} é a matriz de sensibilidade de ordem [NJ x NVC], a qual expressa uma relação linear entre as variáveis dependentes e as variáveis de controle.

◦ POTÊNCIA REATIVA DAS BARRAS DE GERAÇÃO

A sensibilidade destas variáveis com respeito às variáveis dependentes pode ser obtida através da expressão abaixo,

$$\Delta \underline{Q}_G = \left[\begin{array}{c|c|c} \frac{\partial \underline{Q}_G}{\partial \underline{\Theta}_{PV}} & \frac{\partial \underline{Q}_G}{\partial \underline{\Theta}_{PQ}} & \frac{\partial \underline{Q}_G}{\partial \underline{V}_{PQ}} \end{array} \right] \times \begin{bmatrix} \Delta \underline{\Theta}_{PV} \\ \Delta \underline{\Theta}_{PQ} \\ \Delta \underline{V}_{PQ} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

onde ,

- $\partial \underline{Q}_G / \partial \underline{\Theta}_{PV}$ e $\partial \underline{Q}_G / \partial \underline{\Theta}_{PQ}$ são as derivadas das potência reativa das barras de geração com respeito aos angulos das tensões das barras PV e PQ, respectivamente.

- $\partial \underline{Q_G} / \partial \underline{V_{PQ}}$ são as derivadas das potências reativas das barras de geração com respeito a magnitude de tensão das barras PQ.

Da substituição da equação (3.3) em (3.4), obtém-se a expressão da variação nas potências reativas geradas com relação às variáveis de controle, ou seja,

$$\Delta \underline{Q_G} = - \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial \underline{Q_G}}{\partial \underline{\Theta_{PV}}} & \frac{\partial \underline{Q_G}}{\partial \underline{\Theta_{PQ}}} & \frac{\partial \underline{Q_G}}{\partial \underline{V_{PQ}}} \end{bmatrix}}_{\downarrow \underline{S_{QG}}} \times \underline{J_{LF}}^{-1} \times \underline{S_A} \times \begin{bmatrix} \underline{\Delta V_G} \\ \underline{\Delta a} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

onde

$\underline{S_{QG}}$ é a matriz de sensibilidade de ordem [NG x NVC], a qual expressa uma relação linear entre as injeções de potência reativa das barras de geração e as variáveis de controle, sendo que NVC é o número de variáveis de controle e NG é o número de geradores de potência reativa.

Uma forma alternativa para o cálculo dos novos valores das potências reativas geradas, tendo em vista uma variação nas variáveis de controle, é feita através do uso da equação (3.3) que determina os incrementos nas variáveis dependentes. Com base nos valores estimados para as variáveis dependentes, efetua-se o cálculo dos fluxos de potência reativa nas linhas de transmissão através das equações do fluxo de potência, obtendo-se portanto as injeções de potência reativa nas barras de geração estimada para tais incrementos nas variáveis de controle.

As equações utilizadas para o cálculo do fluxo de potência reativa nas linhas de transmissão são dadas por [27]

$$Q_{km} = -V_k^2 \times (B_{km} + B_k) + V_k \times V_m \times B_{km} \times \cos(\theta_{km}) - V_k \times V_m \times G_{km} \times \sin(\theta_{km})$$

$$Q_{mk} = -V_m^2 \times (B_{km} + B_k) + V_k \times V_m \times B_{km} \times \cos(\theta_{km}) + V_k \times V_m \times G_{km} \times \sin(\theta_{km})$$

sendo que a injeção de potência reativa de cada barra de geração é obtida através do somatório dos fluxos de potência reativa de todas as linhas de transmissão que estão conectadas a mesma.

◦ POTÊNCIA ATIVA DA BARRA DE FOLGA

De maneira um tanto similar à expressão (3.4), o incremento de potência ativa correspondente a barra de folga pode ser obtido da seguinte maneira,

$$\Delta P_s = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_s}{\partial \theta_{PV}} & \frac{\partial P_s}{\partial \theta_{PQ}} & \frac{\partial P_s}{\partial V_{PQ}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \theta_{PV} \\ \Delta \theta_{PQ} \\ \Delta V_{PQ} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

onde

- $\partial P_s / \partial \theta_{PV}$ e $\partial P_s / \partial \theta_{PQ}$ são as derivadas da potência ativa da barra de folga com respeito aos ângulos das tensões das barras PV e PQ, respectivamente,

$-\partial P_s / \partial V_{PQ}$ são as derivadas da potência ativa da barra de folga com respeito à magnitude de tensão das barras PQ.

Substituindo-se a equação (3.3) em (3.6), obtém-se que,

$$\Delta P_s = - \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial P_s}{\partial \theta_{PV}} & \frac{\partial P_s}{\partial \theta_{PQ}} & \frac{\partial P_s}{\partial V_{PQ}} \end{bmatrix}}_{\downarrow \vec{S}_{PS}} \times J_{LF}^{-1} \times S_A \times \begin{bmatrix} \frac{\Delta V_G}{\Delta a} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

onde \vec{S}_{PS} é o vetor de sensibilidade [1 x NVC], a qual expressa uma relação linear entre as variáveis de controle e a potência ativa da barra de folga.

3.3.1 - RESTRIÇÕES DE IGUALDADE

Embora este trabalho tenha como objetivo a eliminação de violações nos limites inferiores e/ou superiores das magnitudes de tensão e ainda que muitas restrições sejam violadas na solução inicial dada pelo fluxo de potência, na maioria dos casos envolvendo sistemas práticos somente algumas restrições são ativas na solução final. Em outras palavras, removendo-se uma violação, tende-se a remover as demais [01]. Por esta razão, somente as restrições correspondentes às barras com a maior violação (limite mínimo e/ou máximo, se existirem) necessitam ser incluídas no conjunto de restrições ativas. Isto assegura que a dimensão inicial do sistema linear será sempre bem menor que o problema original.

Desta maneira, o conjunto de restrições ativas (representado pela matriz N) é composto inicialmente pela linha correspondente à magnitude de

tensão da barra que apresenta a violação de maior magnitude do limite inferior e/ou superior. Esta linha representa uma relação linear entre a magnitude de tensão da barra violada e os incrementos nas variáveis de controle ($\Delta \underline{U}$). Isto pode ser expresso de duas maneiras:

- 1.) Se a barra correspondente à maior violação for uma barra de carga, a restrição é determinada por,

$$\Delta VPQ_i = \underline{SVPQ}_i \times \Delta \underline{U} \quad (3.8)$$

onde,

i é o índice correspondente à barra que apresenta a violação de maior magnitude do limite superior e/ou inferior,

ΔVPQ_i é o incremento na magnitude de tensão da i -ésima barra,

\underline{SVPQ}_i é um vetor linha $[1 \times NVC]$ que compõe a matriz resultante do produto $[J_{LF}]^{-1} \times S_A$ cujos elementos expressam a sensibilidade da magnitude de tensão da i -ésima barra com respeito a cada variável de controle,

$\Delta \underline{U}$ é vetor de variáveis de controle.

- 2.) Se a barra correspondente à maior violação for uma barra de geração, não é necessário o uso de sensibilidades já que a esta barra esta associada uma variável de controle, sendo que a restrição é determinada por,

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & \overset{i}{\downarrow} 1 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \underline{U} \end{bmatrix} = \Delta Vi \quad (3.9)$$

onde,

i é o índice correspondente a barra de geração com limite de tensão violado,

ΔU é vetor de variáveis de controle,

ΔV_i é a magnitude da violação.

Devido ao forte acoplamento existente entre a potência reativa e a magnitude de tensão, quando uma restrição de injeção de potência reativa se torna ativa, esta é incluída na matriz de restrições ativas (N) fazendo-se nula a coluna correspondente a V_{Gi} .

3.3.2 - RESTRIÇÕES DE DESIGUALDADE

O procedimento para eliminação das violações nas magnitudes de tensão do sistema consiste basicamente de dois passos. O primeiro é referente à execução do fluxo de potência via Newton-Raphson, e o segundo passo é referente à utilização do método de projeção ortogonal para o cálculo dos incrementos nas variáveis de controle.

Grandes modificações nas variáveis de controle não são comuns na prática usual do fluxo de potência, e podem ser contornadas se impondo-se um limite superior para a magnitude das variações permitidas em uma iteração [17]. Desta maneira, deve-se verificar os incrementos correspondentes às demais variáveis do sistema elétrico que não necessariamente se fizeram ativas durante a iteração, ou seja, devem ser testados os incrementos para todas as variáveis. Estas são modeladas conforme mostrado a seguir :

▷ Magnitudes de Tensão das Barras

Os incrementos correspondentes à magnitude de tensão das barras do

sistema elétrico devem satisfazer seus limites, ou seja,

$$\Delta V_{-G}^{\text{MIN}} \leq \Delta V_{-G} \leq \Delta V_{-G}^{\text{MAX}} \quad (3.10-A)$$

$$\Delta V_{-PQ}^{\text{MIN}} \leq \Delta V_{-PQ} \leq \Delta V_{-PQ}^{\text{MAX}} \quad (3.10-B)$$

onde,

$$\Delta V_i^{\text{MIN}} = V_i^{\text{MIN}} - V_i^{\text{ATUAL}},$$

$$\Delta V_i^{\text{MAX}} = V_i^{\text{MAX}} - V_i^{\text{ATUAL}},$$

MIN e MAX correspondem aos limites mínimo e máximo, respectivamente.

▷ Potência Reativa de Geração

De maneira análoga às magnitude de tensão, o incremento correspondente à injeção de potência reativa de geração deve satisfazer seus limites, isto é,

$$\Delta Q_{-G}^{\text{MIN}} \leq \Delta Q_{-G} \leq \Delta Q_{-G}^{\text{MAX}} \quad (3.11)$$

onde,

$$\Delta Q_{Gi}^{\text{MIN}} = Q_{Gi}^{\text{MIN}} - Q_{Gi}^{\text{ATUAL}},$$

$$\Delta Q_{Gi}^{\text{MAX}} = Q_{Gi}^{\text{MAX}} - Q_{Gi}^{\text{ATUAL}},$$

Os limites mínimos e máximos para a potência reativa gerada são dados pelos limites físicos de cada gerador.

▷ Taps dos Transformadores

Os taps dos transformadores são considerados, para efeito de cálculo pelo método de projeção ortogonal, como variáveis contínuas. Devido ao fato de se verificar que incrementos elevados no valor dos taps dificultam ou mesmo impossibilitam a convergência do programa de fluxo de potência, foi estipulado um valor absoluto máximo para os incrementos correspondentes aos taps a cada iteração. Ou seja,

$$| \Delta a | \leq \text{Perc} \quad (3.12)$$

onde " Perc " é o incremento percentual máximo permitido aos taps.

3.4 - ALGORITMO

O algoritmo proposto neste trabalho para eliminação das violações nas magnitudes de tensão do sistema, pode ser resumido nos seguintes passos:

Passo 01 : Executar um fluxo de Potência para um dado ponto de operação.

Passo 02 : Verificar os limites de tensão das barras do sistema.

2.1 - Magnitude de tensão das barras PQ dentro dos limites: fim do processo.

2.2 - Se uma ou mais violações existem, determinar a maior violação

ΔV_i em magnitude (limite superior e/ou inferior) e a barra correspondente. Prossiga ao passo 03.

Passo 03 : Determine os coeficientes da restrição correspondente à(s) maior(es) violação(ões) (avaliada(s) no passo 2.2, ver equação 3.3) e os inclua na matriz de restrição de igualdade.

Passo 04 : Verifique se existem violações nos limites de magnitude de tensão das barras de geração.

4.1 - Caso todas estejam dentro dos limites, prossiga para o passo 05.

4.2 - Se uma ou mais violações existem, inserir na matriz de restrições ativas a restrição correspondente (equação 3.9) e prossiga para o passo 05.

Passo 05 : Aplique a transformação ortogonal em

N^T , se o sistema for sub-determinado,

N , se o sistema for sobre-determinado.

e obtenha as matrizes Q_1 , Q_2 e R .

Passo 06 : Encontre os incrementos obtidos pela projeção ortogonal.

Passo 07 : Verifique a viabilidade dos incrementos calculados no passo 06.

7.1 - Se algum incremento não é viável, inclua a restrição correspondente na matriz de restrições de igualdade e retorne ao passo 05.

7.2 - Caso contrário, avalie o maior escalar ($0 \leq \alpha \leq 1$) de modo que nenhum limite das variáveis de controle seja violado, isto é :

$$\Delta V_{-G}^{MIN} \leq \alpha \times \Delta V_{-G} \leq \Delta V_{-G}^{MAX}$$

e prossiga para o passo 08.

Passo 08 : Verifique através da expressão linear dada pela equação (3.3), se os incrementos ΔV_i correspondentes as barras de carga são viáveis devido aos seus limites superior e inferior.

8.1 - Caso algum incremento ΔV_{PQ_i} não seja viável, determine os coeficientes da restrição correspondente, dada pela equação 3.3, inclua no conjunto de restrições ativas e retorne para o passo 05.

8.2 - Caso contrário, determine o maior escalar ($0 \leq \alpha \leq 1$) de modo que nenhum limite de magnitude de tensão das barras de carga seja violado, isto é:

$$\Delta V_{-PQ}^{MIN} \leq \alpha \times \Delta V_{-PQ} \leq \Delta V_{-PQ}^{MAX}$$

e prossiga para o passo 09.

Passo 09 : Verifique através do cálculo do fluxo nas LT's, se os incrementos $\Delta Q_{\underline{g}}$ correspondentes as barras de geração são viáveis em relação a seus limites

9.1 - Caso algum incremento ΔQ_{gi} não seja viável, inclua a restrição correspondente na matriz de restrições ativas fazendo nula a coluna correspondente à variável de controle correspondente. Retorne para o passo 05.

Passo 10 : Se os taps forem usados como variáveis de controle, determine o maior escalar (α), de maneira que nenhum incremento viole o máximo percentual permitido aos taps, ou seja,

$$- 2.5\% \leq \alpha * \Delta a \leq 2.5\%$$

Passo 11 : Atualize a magnitude de tensão das barras de geração e os taps dos transformadores e retorne para o passo 01.

3.5 - CONSIDERAÇÕES SOBRE A IMPLEMENTAÇÃO

Na seção 3.3 foram desenvolvidas formulações matemáticas lineares, através do uso de matrizes de sensibilidade, para determinação dos incrementos nas magnitudes de tensão das barras de carga, injeções de potência reativa das barras de geração, injeção de potência ativa da barra de folga e ângulos das tensões das barras PV e PQ. Alguns aspectos relacionados à forma de implementação destas formulações são descritas a seguir.

■ Magnitude de Tensão das Barras de Carga

Os incrementos destas variáveis, bem como dos ângulos de tensão das barras PV e PQ, são obtidos através da equação (3.3), a qual relaciona as variáveis dependentes do fluxo de potência com as variáveis de controle, através do produto da inversa da matriz jacobiana com a matriz de derivadas das injeções de potência ativa e reativa. O cálculo destes incrementos não exige grande esforço computacional, já que a matriz jacobiana é obtida diretamente do fluxo de potência, sendo disponível na forma fatorada.

Para o cálculo dos incrementos nas variáveis dependentes, primeiramente é realizado o produto da matriz S_A , definida anteriormente e de ordem $[NJ \times NVC]$, com o vetor das variáveis de controle (ΔU), de ordem $[NVC \times 1]$, obtendo-se como resultado um vetor \underline{k} de ordem $[NJ \times 1]$. A seguir, efetua-se a resolução do seguinte sistema linear:

$$J_{LF} \times \Delta Y = \underline{K}$$

através do uso de substituição direta e inversa, sendo que ΔY é o vetor de incrementos nas variáveis dependentes de ordem $[NJ \times 1]$.

Quando uma restrição correspondente à magnitude de tensão de uma determinada barra de carga "i" necessita ser incluída na matriz de restrições ativas (N), torna-se necessário o cálculo da sensibilidade da magnitude de tensão desta barra com relação às variáveis de controle, de forma explícita. O cálculo destes fatores de sensibilidade se dá através da resolução de NVC sistemas lineares, isto é:

$$J_{LF} \times \underline{X}_{SPQ}^j = \underline{S}_A^j$$

onde \underline{X}_{SPQ}^j é um vetor de sensibilidade correspondente à resolução do j-ésimo sistema linear,

\underline{S}_A^j é o vetor correspondente à j-ésima coluna da matriz S_A .

Deve-se observar no entanto, que somente o i-ésimo elemento correspondente a resolução de cada sistema linear é armazenado na j-ésima posição do vetor de sensibilidades correspondente à barra violada.

■ Injeção de Potência Reativa Gerada

Os incrementos correspondentes a estas variáveis são obtidos através da equação (3.5), a qual não envolve grande esforço computacional. Isto se deve ao fato de que estes incrementos são determinados diretamente pelo produto da matriz de derivadas das injeções de potência reativa das barras de geração, a qual é uma matriz esparsa de ordem $[NG \times NJ]$, pelo vetor de incrementos nas variáveis dependentes obtido anteriormente.

■ Injeção de Potência Ativa da Barra de Folga

De uma maneira similar à formulação descrita anteriormente, o incremento correspondente à potência ativa da barra de folga (equação (3.7)), é obtido através do produto entre o vetor $[1 \times NJ]$ de derivadas da potência ativa da barra de folga com relação às variáveis dependentes, pelo vetor de

incrementos nas variáveis dependentes, obtidos anteriormente.

3.6 - CONCLUSÕES

Neste capítulo, a modelagem das equações da rede elétrica para a aplicação do método de projeção ortogonal apresentado no capítulo 02, foi apresentada. O problema de violações em magnitude de tensão das barras do sistema pode ser formulado em termos das magnitudes das tensões gerada e taps como variáveis de controle. As restrições de igualdade e desigualdade para este problema são modeladas através do uso de matrizes de sensibilidade definidas a partir das equações do fluxo de potência.

Quando $|V_G|$ e os taps dos transformadores são utilizados como variáveis de controle, fatores de ponderação diferentes podem ser atribuídos aos taps, de maneira a permitir que o perfil de tensão do sistema seja controlado essencialmente pela magnitude de tensão de geração e os taps dos transformadores sejam utilizados como variáveis de controle secundárias. Isto é compatível com a prática de operação atual já que, freqüentes variações em taps tem um efeito indesejável de redução da vida dos comutadores [13].

CAPITULO 04 - RESULTADOS NUMÉRICOS

Este capítulo apresenta os resultados numéricos obtidos da implementação do método de projeção ortogonal bem como, aspectos práticos relacionados com a robustez, confiabilidade e rapidez de convergência da técnica proposta. Comparações entre diferentes formulações são apresentadas.

4.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

Para a implementação da técnica de projeção ortogonal proposta neste trabalho foram escritos programas na linguagem FORTRAN, os quais seguem basicamente o algoritmo descrito no capítulo 03.

Sempre que possível, técnicas de armazenamento compacto e ordenação foram usadas para explorar a esparsidade das matrizes envolvidas no processo. Todos os resultados numéricos foram obtidos no computador IBM 3090 usando o compilador FORTRAN VS 2.2.

Para avaliar o desempenho da técnica proposta, testes com sistemas de potência de diferentes dimensões foram considerados. As características gerais destes sistemas são dados pela tabela 4.1. Os dados iniciais requeridos pelo programa de fluxo de potência AC foram obtidos da referência [31].

Tab. 4.1 - Características Gerais dos Sistemas

Sistema	NB	NG	NT
Sis. 6 barras	06	02	02
Sis. 18 barras	18	05	06
IEEE 30 barras	30	06	04
IEEE 57 barras	57	07	17
IEEE 118 barras	118	34	09

NB é o número total de barras do sistema,

NG é o número de dispositivos de geração de potência reativa,

NT é o número de transformadores com tap variável.

4.2 - COMPARAÇÃO QUANTO AO GRUPO DE VARIÁVEIS DE CONTROLE.

Como descrito no Capítulo 03, este trabalho utiliza como variáveis de controle as magnitudes de tensão de geração e os taps dos transformadores com comutação sob carga, sendo possível o uso independente das mesmas.

Nesta seção, as Tabelas 4.3 e 4.4 apresentam os resultados obtidos para o sistema 06 Barras, tendo como diferença a formulação do problema utilizando diferentes grupos de variáveis de controle, isto é, considerando (a) apenas a magnitude das tensões nas barras de geração " $|V_G|$ " e (b) a magnitude das tensões geradas e os taps como variáveis independentes. Tais resultados visam demonstrar a influência desses dois tipos de variáveis de controle na execução do controle corretivo.

Cada iteração corresponde ao cálculo dos incrementos nas variáveis de controle pelo método de projeção ortogonal e a solução de um fluxo de potência AC para verificar o efeito resultante dos incrementos obtidos nas variáveis do sistema de potência. É possível observar em cada iteração a diminuição, tanto do número de violações como de suas magnitudes.

Quando os taps dos transformadores são utilizados como variável de controle, em conjunto com a magnitude das tensões das barras de geração (Tabela 4.4), foram adotados fatores de ponderação unitários para as magnitudes de tensão de geração e um fator de ponderação maior que 1 para os taps dos transformadores. Isto foi efetuado com o intuito de evitar que os incrementos correspondentes às magnitudes das tensões geradas sejam afetados pela ponderação, devido ao forte acoplamento destas variáveis com o perfil de tensão do sistema. Esta estratégia visa fazer com que os taps dos transformadores sejam utilizados como variáveis secundárias, de maneira que as variações na magnitude das tensões geradas tenham um maior peso para levar o problema a solução final, como mencionado anteriormente no capítulo 03. Deve-se observar que na escolha dos fatores de ponderação para cada variável de controle, existe a possibilidade de levar o sistema a um ponto de operação onde não seja possível a convergência para uma solução viável, e em alguns casos até mesmo à divergência da solução do fluxo de potência. Esta situação pode ocorrer, quando os fatores de ponderação atribuídos a determinadas variáveis de controle (por exemplo, os taps de transformadores) são pequenos e conseqüentemente os incrementos atribuídos aos mesmos são elevados. Estes incrementos podem alterar a distribuição dos fluxos de potência reativa nas linhas de transmissão, de maneira a dificultar o fechamento do balanço de

potência.

São mostrados na Figura 4.1 o diagrama unifilar do sistema de 06 barras e na Tabela 4.2, suas condições iniciais correspondentes as variáveis de controle (Δu), para uma melhor compreensão dos resultados apresentados nas Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5. Os dados do sistema são apresentados no Apêndice C.

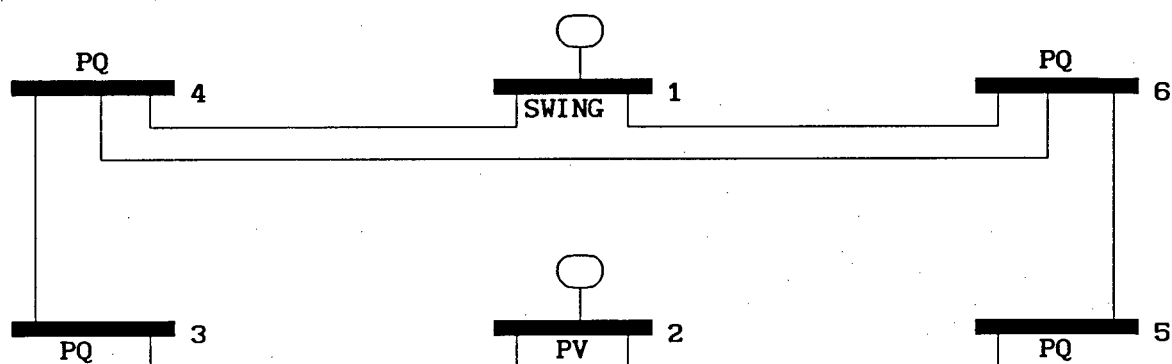


Figura 4.1 - Diagrama Unifilar do Sistema 06 Barras.

onde a_i representa o i -ésimo tap transformador.

TABELA 4.2 - CONDIÇÃO INICIAL DAS VARIÁVEIS DE CONTROLE P/ O SIST. 06 BARRAS

Barra	Tensão		Taps	
	Magnitude (P.U.)	Angulo (Graus)	p/ Barra	Relação de Transformação (pu)
01	1.0000	0.000	- - -	- - - -
02	1.0000	-2.977	- - -	- - - -
03	0.9036	-14.8843	- - -	- - - -
04	0.8457	-11.2622	03	0.9090
05	0.8134	-14.4181	- - -	- - - -
06	0.8283	-14.1535	05	0.9760

TAB. 4.3 - RESULTADOS DA PO P / SISTEMA DE 06 BARRAS
VARIÁVEL DE CONTROLE : " | V_g | "

		Incrementos nas V.C. para cada Proj. Ortog.		Resultados do L.F. correspondente a cada Proj. Ortog.		
		ΔV_1 (pu)	ΔV_2 (pu)	Número Viol.	Mag. Viol. (Máxima) (pu)	Barra
L.F. ⁰		- - - - -	- - - - -	03	-0.8661D-01	05
P R O J	01	0.4717D-01	0.5632D-01	02	-0.1684D-01	05
	02	0.1007D-01	0.1212D-01	01	-0.2353D-02	05
	03	0.1431D-02	0.1721D-02	01	-0.3076D-03	05
	04	0.1874D-03	0.2255D-03	00	- - - - -	- - - - -
TEMPO DE CPU (SEG) = 0.04801						

TAB. 4.4 - RESULTADOS DA PO P/ SISTEMA DE 06 BARRAS
VARIÁVEIS DE CONTROLE : " | V_g | " e TAPs "

		INCREMENTOS NAS VARIÁVEIS DE CONTROLE OBTIDOS A CADA PROJEÇÃO ORTOGONAL				RESULTADOS DO LF P/ CADA PROJ. ORTOGONAL		
		ΔV_1 (pu)	ΔV_2 (pu)	Δa_1 (pu)	Δa_2 (pu)	Num. Viol	Maguintude da Maior Violação (pu)	Barra
Ponde- ção		W1 = 1	W2 = 1	W3 = 150	W4 = 150			
L.F. ⁰		- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -	03	-0.8661D-1	05
P R O J	01	0.4552D-01	0.5436D-1	-0.7802D-2	-0.1098D-1	02	-0.1883D-1	05
	02	0.1085D-01	0.1302D-1	-0.1788D-2	-0.2591D-2	01	-0.3138D-2	05
	03	0.1839D-02	0.2206D-2	-0.3008D-3	-0.4378D-3	01	-0.4935D-3	05
	04	0.2901D-03	0.3480D-3	-0.4737D-4	-0.6900D-4	00	- - - - -	- -
Tempo Total de CPU (Segundos) = 0.04909								

onde, ΔV_i representa o incremento de tensão da i-ésima barra de geração,

Δa_i é o incremento correspondente ao i-ésimo tap,

W_i é a ponderação dada a i-ésima variável de controle.

Verifica-se que, quando somente as magnitudes das tensões de geração são utilizadas como variáveis de controle (tabela 4.3), os incrementos totais correspondentes a essas variáveis na tabela 4.4, são menores. Isto se deve à tendência do método de projeção ortogonal em distribuir o incremento entre as variáveis de controle, embora a influência dos taps seja pequena através do uso de fatores de ponderação elevados.

Observa-se porém, que a magnitude da maior violação correspondente a cada iteração do método de projeção ortogonal, apresenta-se menor, em módulo, quando a magnitude de tensão de geração é utilizada separadamente como variável de controle (Tabela 4.3). Isto ocorre devido ao fato do perfil de tensão do sistema ser fortemente influenciado pelo nível de tensão das barras de geração, de maneira que atribuindo-se incrementos maiores às magnitudes de tensão de geração, tende-se a eliminar mais rapidamente as violações.

4.3 - INFLUÊNCIA DA PONDERAÇÃO NO PROCESSO DE CONVERGÊNCIA

Inicialmente, numa tentativa de se considerar os diferentes efeitos causados na característica de convergência à solução viável pelo grupo de variáveis de controle ΔU , isto é, pelas magnitude de tensão de geração (u_1) e taps dos transformadores (u_2), utilizou-se fatores de escalonamento, k , nas restrições que se tornavam ativas e, portanto, necessitam ser incluídas na matriz de restrições de igualdade (N). Tais fatores foram definidos como:

[24]

$$k = \frac{|| \underline{Ru1} ||}{|| \underline{Ru2} ||}$$

onde $\underline{Ru1}$ e $\underline{Ru2}$ são vetores formados pelos coeficientes da nova restrição, correspondentes às variáveis de controle $\underline{u1}$ e $\underline{u2}$, respectivamente.

Assim sendo, os coeficientes da nova restrição correspondentes aos taps dos transformadores, são agora expressos da seguinte maneira:

$$\underline{Ru1} = k \times \underline{Ru2}$$

O uso de fatores de escalonamento em uma determinada restrição representa simplesmente a uniformização dos coeficientes que a compõem. Ou seja, é a representação destes coeficientes, os quais correspondem a grupos distintos de variáveis de controle, em uma mesma base. No entanto, fatores de ponderação, além de apresentar esta característica, oferecem a opção de que determinadas variáveis de controle podem ter uma maior ou menor influência no processo de convergência. Isto é possível através da atribuição de fatores de ponderação diferentes para cada variável.

Com o objetivo de demonstrar a influência dos fatores de ponderação no processo de convergência, a Tabela 4.5 apresenta os resultados obtidos para o sistema de 06 barras agora com ponderações diferentes para cada tap dos transformadores. Ou seja, foi atribuído um peso maior ao tap "1" e um menor ao tap "2". A escolha de tais fatores de ponderação foi feita de forma heurística, já que a meta seria demonstrar que elevando o(s) fator(es) de ponderação de determinadas variáveis de controle, diminuem-se os incrementos

correspondentes as mesmas, e vice-versa.

Como se pode observar, os incrementos correspondentes aos taps na Tabela 4.5, quando comparados com os da Tabela 4.4 são afetados de acordo com as variações nos respectivos fatores de ponderação. Ou seja, os incrementos correspondentes ao tap "1" aumentam com relação aos respectivos incrementos apresentados na Tabela 4.4 e os incrementos correspondentes ao tap "2" diminuem. Já os incrementos nos módulos das magnitudes de tensão das barras de geração permaneceram praticamente os mesmos.

TABELA 4.5 - RESULTADOS DA PO P/ SISTEMA DE 06 BARRAS
PONDERACOES DIFERENTES PARA OS TAPS

		INCREMENTOS NAS VARIÁVEIS DE CONTROLE OBTIDOS A CADA PROJECAO ORTOGONAL				RESULTADOS DO LF P/ CADA PROJ. ORTOGONAL		
		ΔV_1 (pu)	ΔV_2 (pu)	Δa_1 (pu)	Δa_2 (pu)	Num. Viol	Magnitude Máxima Violacao (pu)	Barra
Pondera- cao		W1 = 1.0	W2 = 1.0	W3 = 100	W4 = 200			
L.F. ⁰		- - - -	- - - -	- - - -	- - - -	03	-0.8661D-1	05
P	01	0.4552D-01	0.5436D-1	-0.9555D-2	-0.9511D-2	02	-0.1898D-1	05
R	02	0.1094D-01	0.1312D-1	-0.2211D-2	-0.2263D-2	01	-0.3201D-2	05
O	03	0.1877D-02	0.2251D-2	-0.3764D-3	-0.3866D-3	01	-0.5099D-3	05
J	04	0.2999D-03	0.3596D-3	-0.6005D-4	-0.6171D-4	00	- - - - -	- -
Tempo Total de CPU (Segundos) = 0.04971								

onde,

ΔV_i representa o incremento de tensão da i-ésima barra de geração,

Δa_i é o incremento correspondente ao i-ésimo tap,

W_i é a ponderação dada à i-ésima variável de controle.

4.4 - RESULTADOS GERAIS DOS SISTEMAS - TESTE

4.4.1 - TENSÕES EM BARRAS DE GERAÇÃO COMO VARIÁVEIS DE CONTROLE

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos para os outros sistemas-teste sumarizados na Tabela 4.1 (sistemas de 18, 30, 57 e 118 barras). A Tabela 4.5 apresenta os resultados obtidos para a situação onde somente a magnitude das tensões geradas é adotada como variável de controle.

TABELA 4. 6 - RESULTADOS DO MÉTODO DE PO P/ MÓDULO DAS TENSÕES EM BARRAS DE GERAÇÃO COMO VARIÁVEL DE CONTROLE

Sistema	Num. de violações	Num. Iter p/ Convergência	Tempo Total de CPU (seg.)	Norma Qg c/ relação L.F.inicial	Norma Vg c/ relação L.F. inicial
18 barras	11	03	0.11015	0.9385D+2	0.12962D-1
30 barras	24	NÃO CONVERGIU	-----	-----	-----
57 barras	36	06	0.67891	0.2622D+1	0.19651D-1
118 barras	53	14	0.41838D+1	0.1785D+2	0.13545D-1

Verifica-se que em todos os sistemas o método apresentou um bom desempenho na eliminação das violações nas magnitudes de tensão. Para o caso do sistema de 30 barras, apesar de não ter sido possível a convergência para uma solução viável, o algoritmo conseguiu reduzir o número de violações do limite inferior, inicialmente de 24, para 03. Isto é explicado devido ao fato de todos os geradores terem atingido seus respectivos valores máximos de tensão, e ainda existirem violações do limite inferior. Neste caso, somente o incremento das tensões de geração não foi suficiente para eliminação das

violações.

Com o objetivo de se estabelecer uma comparação entre os resultados apresentados neste trabalho com os apresentados pela referência [01] (Apêndice B), as ponderações correspondentes às magnitudes de tensão de geração foram consideradas unitárias. É possível observar que o número de iterações para a convergência é influenciado pelo uso de fatores de ponderação, de maneira a crescer tanto quanto maior for a influência dos taps no processo de otimização. Isto pode ser ilustrado através do sistema de 57 barras, o qual demonstrou variar de 25 a 06 iterações para a obtenção da solução viável dependendo da influência dos taps ser maior ou menor, respectivamente.

Pode-se observar que após todas as violações nas magnitudes de tensão do sistema serem eliminadas, determinadas barras de geração, sofrem maiores mudanças com relação ao seu valor inicial dado pelo fluxo de carga, ou seja, determinadas barras de geração apresentam uma maior influência na eliminação das violações. Tendo por base esta constatação, vários testes foram feitos no sentido de se escolher os fatores de ponderação adequados às magnitudes de tensão de geração, com o intuito de melhorar os resultados apresentados na Tabela 4.6. A dificuldade neste procedimento encontra-se na determinação destes fatores de ponderação, sendo que somente para o sistema do IEEE 57 Barras foi possível melhorar os resultados apresentados pela Tabela 4.6, os quais são apresentados na Tabela 4.7-A e 4.7-B.

TABELA 4.7-A - RESULTADOS P/ O SIST. IEEE 57 BARRAS ATRAVES DO
USO DE PONDERACAO "ADEQUADA" NAS MAG. TENSAO

Num. de violacoes	Num. Iter p/ Convergencia	Tempo Total de CPU (seg.)	Norma Qg c/ relacao L.F.inicial	Norma Vg c/ relacao L.F.inicial
36	04	0.47831	0.1863D+1	0.184853D-1

TABELA 4.7-B - FATORES DE PONDERACAO CORRESPONDENTES AS MAGNITUDES
DAS TENSOES DE GERACAO

W 1	W 2	W 3	W 4	W 5	W 6	W 7
0.1076D+3	0.5336D+1	0.2237D+1	0.1307D+1	0.1000D+1	0.1489D+1	0.7604D+1

A forma como estes fatores de ponderação são obtidos é descrita a seguir :

- 1) Calcula-se os incrementos correspondentes às magnitudes de tensão de geração, os quais expressam a mudança da condição inicial, obtida do fluxo de potência, para a condição final, obtida após todas as violações terem sido eliminadas.
- 2) Seleciona-se o maior destes incrementos, em módulo, e obtem-se tais fatores através da expressão:

$$W_i = \frac{\Delta V^{\text{máximo}}}{\Delta V_i}$$

onde,

W_i é o fator de ponderação correspondente à magnitude de tensão da i-ésima barra de geração,

ΔV_i é o incremento correspondente à magnitude de tensão da i-ésima barra de geração.

Como pode-se observar, os fatores de ponderação são obtidos de maneira a que a variável correspondente ao maior incremento, tenha um menor fator de ponderação (W_5), e vice-versa (W_1).

4.4.2 - INCLUSÃO DOS TAPS COMO VARIÁVEIS DE CONTROLE

Na tabela 4.8 são apresentados os resultados do caso em que os taps são utilizados como variáveis de controle em conjunto com $|V_G|$.

TABELA 4.8 - RESULTADOS DO METODO DE PROJ. ORTOG.
VARIÁVEIS DE CONTROLE : $|V_G|$ E TAP's

Sistema	Num. de violacoes	Num. Iter p/ Convergencia	Tempo Total de CPU (seg)
18 Barras	11	07	0.26787
30 Barras	24	06	0.24547
57 Barras	36	08	0.10911D+1
118 Barras	53	15	0.47502D+1

Neste caso, as ponderações correspondentes à $|V_G|$ foram consideradas como sendo unitárias e aos taps foram atribuídos fatores de ponderação elevados (ou seja, pouca influência no processo de convergência).

Comparando-se os resultados apresentados pelas tabelas 4.6 e 4.8, verifica-se que com o uso dos taps como variável de controle, o número de iterações e o tempo de CPU para se obter a convergência sofrem acréscimo. Verifica-se também, que o sistema de 30 barras, para o qual não foi possível a

correção das violações de tensão somente com mudanças nas magnitudes de tensão de geração, no presente caso, em conjunto com pequenos ajustes nos taps dos transformadores, foi possível levar o sistema a uma condição de operação viável, no que diz respeito aos limites das tensões. Isto vem enfatizar a importância do uso de variáveis de controle alternativas (tais como os taps de transformadores) na determinação de ações de controle corretivo para o sistema elétrico, de maneira a dar mais opções ao operador para levar o sistema a uma condição de operação viável, ou seja, onde todas as magnitudes de tensão estejam dentro dos limites.

Na tabela 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12 são apresentados detalhes do processo de convergência do método de projeção ortogonal para os sistemas de 18, 57, 30 e 118 barras, respectivamente. Deve-se observar que, nestas tabelas, cada linha correspondente às projeções inclui tanto a solução de um sistema linear subdeterminado quanto a de um fluxo de potência via Newton-Raphson.

TABELA 4.9 - RESULTADOS PARA SISTEMA DE 18 BARRAS
VARIÁVEIS DE CONTROLE : V_g

		NUM. VIOL.	MAG. MAX. VIOL. (pu)	TIPO DE LIMITE
L. F. ⁰		11	-0.8318D-01	INFERIOR
P	01	02	-0.1069D-01	INFERIOR
R	02	02	-0.4150D-03	INFERIOR
O			0.2170D-02	SUPERIOR
J	03	00	-----	-----

TABELA 4.10 - RESULTADOS PARA SISTEMA DE 57 BARRAS
VARIÁVEIS DE CONTROLE : $|V_g|$

		NUM. VIOL.	MAG. MAX. VIOL. (pu)	TIPO DE LIMITE
L.F. ⁰		36	-0.6376D-01	INFERIOR
P R O J	01	02	+0.2022D-01	SUPERIOR
	02	02	+0.1507D-01	SUPERIOR
	03	02	+0.1450D-01	SUPERIOR
	04	03	+0.1091d-01	SUPERIOR
	05	01	+0.6929d-03	SUPERIOR
	06	00	- - - - -	- - - - -

Analisando-se as Tabelas (4.9) e (4.10), as quais apresentam os resultados correspondentes aos sistemas de 18 e 57 barras, verifica-se que os dois sistemas apresentam características semelhantes no decorrer do processo de convergência, ou seja:

- Na Tabela 4.9, é observado que, na segunda projeção, o método elimina uma das duas violações do limite inferior, mas no entanto é violada uma nova restrição, desta feita no limite superior da magnitude das tensões nodais.
- Na Tabela 4.10, pode-se observar que na primeira projeção, o método elimina as trinta e seis (36) violações do limite inferior apresentadas pela solução inicial, contudo são detectadas duas violações do limite superior.

Em ambos os casos, quando se tentou eliminar as violações do limite inferior das tensões, ocorreram violações do limite superior. Deve ser lembrado no entanto, que a elevação do nível de tensão das barras de geração tende a elevar o perfil de tensão do sistema. Deve-se atentar também para o fato de que em nenhum caso estas "novas" violações possuem magnitude maior, em módulo, do que a anterior à iteração. Uma análise feita a priori para o sistema de 57 barras na solução inicial dada pelo fluxo de potência, revelou que as magnitudes das tensões nas barras correspondentes às duas "novas" violações, já estavam próximas ao seu limite superior. Esta constatação vem explicar a oscilação no processo de convergência.

TABELA 4.11 - RESULTADOS PARA SISTEMA DE 30 BARRAS
VARIÁVEIS DE CONTROLE : $|V_g|$

		NUM. VIOL.	MAG. MAX. VIOL. (pu)	TIPO DE LIMITE
P R O J E Ç Ã O	L.F. ^o	24	-0.1326D+00	INFERIOR
	01	19	-0.9428D-01	INFERIOR
	02	12	-0.6500D-01	INFERIOR
	03	06	-0.4367D-01	INFERIOR
	04	04	-0.3314D-01	INFERIOR
	05	03	-0.2929D-01	INFERIOR
	06	03	-0.2844D-01	INFERIOR
	07	03	-0.2481D-01	INFERIOR
	08	03	+0.2300D-01	INFERIOR
	09	D.I.	= = = = =	= = = = =

onde, D.I. significa que foi detectada uma situação de inviabilidade completa.

No caso da Tabela 4.11, é importante observar que a inviabilidade detectada está relacionada com o fato de todas as magnitudes de tensão nas barras de geração atingirem seus respectivos limites superiores, sendo que ainda permanecem três (03) violações do limite inferior. Ou seja, esgotaram-se as ações de controle possíveis, e ainda existem violações nas magnitudes de tensão do sistema resultando, portanto, em uma condição de inviabilidade na obtenção de uma solução viável.

TABELA 4.12 - RESULTADOS PARA SISTEMA DE 118 BARRAS
VARIÁVEIS DE CONTROLE : $| V_g |$

		NUM. VIOL.	MAG. MAX. VIOL. (PU)	TIPO DE LIMITE
L.F. ⁰		53	-0.2940D-01	INFERIOR
P R O J E C T O	01	42	-0.2581D-01	INFERIOR
	02	39	-0.2507D-01	INFERIOR
	03	32	-0.2094D-01	INFERIOR
	04	30	-0.1820D-01	INFERIOR
	05	23	-0.1680D-01	INFERIOR
	06	20	-0.9299D-02	INFERIOR
	07	18	-0.6875D-02	INFERIOR
	08	16	-0.5543D-02	INFERIOR
	09	12	-0.3894D-02	INFERIOR
	10	08	-0.3865D-02	INFERIOR
	11	06	-0.3686D-02	INFERIOR
	12	04	-0.3135D-02	INFERIOR
	13	01	-0.3496D-03	INFERIOR
	14	00	= = = = =	= = = = =

L.F.⁰ representa fluxo de potência AC para a condição inicial,

Na Tabela 4.12, observa-se que para este sistema o processo de eliminação das violações foi um pouco mais lento, quando comparado com os resultados para os demais sistemas apresentados anteriormente. Deve-se notar, entretanto, que isto ocorre devido à magnitude do passo, (α), ser limitada, a cada iteração, pelas injeções de potência reativa.

A determinação dos incrementos correspondentes a estas injeções, através da expressão (3.5) do capítulo 03, fornecem resultados pouco satisfatórios. Os incrementos estimados com base no modelo linearizado não correspondem ao valor obtido na solução do fluxo de potência. Isto é, na execução do fluxo de potência, uma eventual conversão de barras PV para PQ, pode ocorrer, de tal forma que o valor estimado torna-se sem efeito. Neste caso, a magnitude de tensão que sofre a conversão não será necessariamente a magnitude estimada pelo método de projeção ortogonal, o que pode fazer com que o sistema evolua para um ponto de operação diferente daquele previsto pelo modelo linearizado.

4.5 - COMPARAÇÃO COM OUTROS MÉTODOS

Esta seção tem como objetivo demonstrar o desempenho da técnica proposta por este trabalho frente a outros métodos apresentados pela literatura [1,2,3,4,7,8,9,15,22,23]. Devido à natureza do problema ser a eliminação das violações nas magnitudes das tensões das barras, ao acoplamento existente entre potência reativa / tensão e a disponibilidade do programa utilizado pela referência [01], são apresentados seus resultados na sub-seção seguinte.

Deve-se observar que, havendo uma grande quantidade de trabalhos que utilizam técnicas de programação linear para determinação de soluções corretivas no sistema elétrico, são apresentados os resultados para tal técnica.

4.5.1 - USO DA GERAÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA COMO VARIÁVEL DE CONTROLE

A tabela 4.13 apresenta os resultados obtidos pelo método descrito pela referência [01], no qual a variável de controle é a injeção de potência reativa das barras de geração (Q_g). Tal formulação utiliza equações linearizadas derivadas das equações do fluxo de potência, constituindo um procedimento para determinação de soluções corretivas similar ao adotado neste trabalho.

TABELA 4.13 - RESULTADOS DO METODO DE PO OBTIDOS NAS REFERENCIAS [1]

Sistema	Num. de violacoes	Num. Iter p/ Convergencia	Tempo Total de CPU (seg)	Norma Q_g c/ relacao L.F.inicial	Norma V_g c/ relacao L.F.inicial
18 barras	11	02	0.089	0.7480D+2	0.013299
30 barras	24	NÃO CONVERGIU	-----	-----	-----
57 barras	36	08	1.197	0.1006D+1	0.01818
118 barras	53	03	3.743	0.1284D+2	0.67727D-1

Com o objetivo de estabelecer uma comparação entre o desempenho das duas formulações, isto é, a formulação proposta neste trabalho, onde a magnitude de tensão gerada é usada como controle, contra a da referência [1] onde a potência reativa gerada é monitorada para eliminar as violações, as ponderações dos dois conjuntos de variáveis de controle foram estabelecidas

como sendo unitárias.

Comparando as tabelas 4.6 e 4.13, verifica-se que, através da formulação proposta em [01] para o sistema de 30 barras, também não foi possível obter uma solução viável, o que confirma os resultados mostrados na seção anterior. Neste caso, a detecção da solução inviável foi realizada através da análise dos multiplicadores de Lagrange (Capítulo 04 de [01]), usando o procedimento descrito no capítulo 02. Para o sistema de 118 barras, o número de iterações sofre uma diminuição acentuada, enquanto que o tempo de CPU permanece quase que o mesmo. Isto se deve ao fato de que um número maior de restrições tornam-se ativas durante cada iteração do método representado pela tabela 4.13.

4.5.2 - USO DE TÉCNICAS DE PROGRAMAÇÃO LINEAR

Nesta sub-seção, são apresentados os resultados obtidos através do uso de programação linear para os sistemas-teste de 18, 30 e 57 barras do IEEE, tendo como variável de controle a injeção de potência reativa.

As tabelas 4.14, 4.15 e 4.16 apresentam os níveis de tensão de geração para os sistemas mencionados após a eliminação de todas as violações de tensão através dos métodos de programação linear e projeção ortogonal.

Deve-se observar que para o sistema de 30 barras aumentou-se o limite superior de magnitude de tensão de todas as barras de 1.05 p.u., para 1.10 p.u. de forma a garantir a existência de uma solução viável no caso em questão.

TABELA 4.14 - NIVEL DE TENSAO
DE GERACAO P/ SIST. 18 BARRAS
EM P.U.

SISTEMA DE 18 BARRAS	
P.L.	P.O.
V1 = 1.050	V1 = 1.004
V3 = 1.050	V3 = 1.000
V6 = 1.050	V6 = 0.987
V14 = 1.040	V14 = 1.000
V15 = 1.019	V15 = 1.028

TABELA 4.15 - NIVEL DE TENSAO
DE GERACAO P/ SIST. 30 BARRAS
EM P.U.

SISTEMA DE 30 BARRAS	
P.L.	P.O.
V1 = 1.100	V1 = 0.991
V3 = 1.100	V3 = 1.070
V6 = 1.100	V6 = 1.008
V14 = 1.084	V14 = 1.029
V15 = 1.016	V15 = 1.030
V12 = 1.014	V12 = 1.054

TABELA 4.16 - NIVEL DE TENSAO
DE GERACAO P/ SIST. 57 BARRAS
EM P.U.

SISTEMA DE 57 BARRAS	
P.L.	P.O.
V1 = 1.051	V1 = 1.041
V2 = 1.038	V2 = 1.027
V3 = 1.036	V3 = 1.026
V6 = 1.060	V6 = 1.051
V8 = 1.085	V8 = 1.098
V9 = 1.042	V9 = 1.042
V12 = 1.016	V12 = 1.027

Pode-se observar que os níveis de tensão de geração obtidos pelo algoritmo baseado em programação linear são mais elevados do que os obtidos

pela projeção ortogonal para eliminação das mesmas violações. Isto se deve à forma com que o problema de soluções corretivas foi formulado e a característica de convergência do método de programação linear, o qual percorre os vértices da região viável em busca da solução, podendo levar desta maneira suas variáveis de controle a operar nos limites.

4.5 - CONCLUSÕES

Este capítulo demonstra o desempenho global da técnica de projeção ortogonal, proposta neste trabalho. O uso dos taps transformadores como variável de controle é mostrado ser uma boa opção como medida corretiva secundária. Fatores de ponderação podem influenciar no processo de convergência devido a determinados controles terem uma maior influência sobre a função objetivo.

Através dos resultados para o sistema-teste de 06 barras apresentados nas tabelas 4.3 e 4.4, mostra-se que o uso de fatores de ponderação diferentes aos taps, afeta diretamente os seus incrementos obtidos pela projeção ortogonal de acordo com suas respectivas ponderações. Ou seja, os incrementos correspondentes a determinados taps podem ser acrescidos, ou até mesmo inibidos, dependendo se os seus respectivos fatores de ponderação são pequenos ou grandes, respectivamente.

Observa-se que a determinação de uma solução viável para o sistema de 30 barras somente foi possível quando da utilização dos taps como variável

de controle, embora fossem atribuídos fatores de ponderação elevados aos mesmos. Isto mostra que os taps transformadores podem ser utilizados como variáveis de controle secundárias de maneira satisfatória, como foi descrito anteriormente no capítulo 03.

CAPÍTULO 05 - CONCLUSÕES

Durante a operação de um sistema de potência, podem ocorrer eventos que o levem a um estado em que existam violações nos limites de tensão das barras e/ou fluxos de potência nas LT's. Diante destas situações, o operador deve exercer ações de controle corretivo, as quais consistem em ajustes nas variáveis de controle adequadas para cada caso.

O problema de controle de tensão e potência reativa em um sistema de potência está diretamente relacionado não somente com a qualidade de serviço para suprir a demanda, mas também com a segurança e/ou economia da operação do sistema de potência.

Apresenta-se neste trabalho uma técnica para a determinação de soluções corretivas, baseada no método de projeção ortogonal, a qual visa projetar ortogonalmente a solução inviável sob o ponto de vista da operação do sistema elétrico, sobre um sub-espço delimitado pelas restrições que definem a região viável. O objetivo é propor uma nova metodologia alternativa para a determinação de soluções corretivas, visando a eliminação de violações nas magnitudes de tensão das barras do sistema, utilizando como variável de controle a magnitude de tensão das barras de geração. Numa tentativa de tornar este trabalho mais abrangente, são formuladas como alternativas básicas o uso ou não de taps de transformadores.

O desempenho do método proposto foi avaliado com base em sistemas-teste de 06, 18, 30, 57 e 118 barras. Os resultados para tais sistemas foram satisfatórios sob os pontos de vista tanto de robustez como de rapidez e confiabilidade. Eles demonstram o potencial do método proposto para ser utilizado como uma útil ferramenta computacional, na eliminação de

violações de tensão através das ações de controle corretivo.

Os taps foram considerados como variáveis contínuas, embora sejam na realidade variáveis discretas [4,10,17,32]. Grandes variações nos taps dos transformadores não são comuns na prática de operação. Os taps são geralmente utilizados para um ajuste fino desde que variações frequentes em taps tem um efeito indesejável de abreviação da vida dos transformadores [13]. Nesse sentido, foi adotado neste trabalho um limite para o incremento dos taps, já que foi verificado que incrementos elevados, dificultam e em alguns casos impossibilitam a solução fornecida pelo programa de fluxo de potência.

Conceitos para o uso de fatores de ponderação foram introduzidos com o intuito de dar ponderações diferentes às variáveis de controle. Tais fatores permitem que determinadas variáveis de controle tenham maior ou menor influência no processo de convergência, incluindo a inibição completa de variações indesejadas em certos controles.

Matrizes de sensibilidade baseadas nas equações da rede são calculadas fazendo uso, sempre que possível, de técnicas de esparsidade. Tais matrizes são utilizadas para estimar as mudanças nas variáveis dependentes (tensões nas barras de carga do sistema, injeção reativa nas barras de geração), quando incrementos são dados às variáveis de controle.

Devido ao acoplamento existente entre a potência reativa gerada e a magnitude de tensão das barras, o limite do passo correspondente às injeções de potência reativa não foi feito com base nos incrementos estimados através de matrizes de sensibilidade. Esta correção é feita da forma convencional utilizada na solução do fluxo de potência. Isto é, quando alguma barra de geração atinge seu limite reativo máximo ela é convertida do tipo PV, para o

tipo PQ. Isto se deve ao fato de que o passo, quando calculado com base nas relações de sensibilidade, fornece resultados conservativos, limitando excessivamente o incremento nas variáveis de controle, e portanto dificultando o processo de convergência.

Demonstrou-se que o uso de fatores de ponderação elevados para os taps causa a redução ou até a inibição completa da sua influência no processo de convergência, fazendo com que o perfil de tensão do sistema seja controlado essencialmente pela magnitude de tensão de geração, sendo os taps desta feita utilizados como variáveis de controle secundárias. Apesar deste fato, observou-se também a importância do uso de variáveis de controle alternativas (taps de transformadores) no cálculo de ações de controle corretivo para o sistema elétrico. Esta situação é ilustrada através do sistema-teste de 30 barras, no qual a determinação de uma solução viável demonstrou não ser possível, tanto quando a variável de controle é a magnitude das tensões de geração (implementado neste trabalho), como quando a variável de controle é a geração de potência reativa [01].

O método implementado, utilizando como variáveis de controle as magnitudes de tensões das barras de geração e opcionalmente os taps de transformadores, apresenta aproximadamente o mesmo tempo de CPU que o método que utiliza como variável de controle as injeções de potência reativa de geração [33], embora seja necessário um número maior de iterações para eliminação das violações nas magnitudes de tensão. Por outro lado, em termos de requisito de memória, a técnica proposta possui a vantagem de ser uma pequena extensão da metodologia de fluxo de potência via método de Newton Raphson.

O método de projeção ortogonal obtém o incremento de mínima norma para as variáveis de controle quando o sistema linear de equações que se tornam ativas a cada iteração é subdeterminado. Isto é desejável visto que representa a mínima mudança nas variáveis de controle de forma a obter uma condição de operação viável para o sistema elétrico.

SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Como perspectivas de continuidade de estudos e pesquisas nesta área, propõe-se :

- a utilização do método de projeção ortogonal para eliminação ou minimização das possíveis violações que possam surgir nos limites de potência ativa transmitida, após todas as violações de tensão serem eliminadas.
- especificação e desenvolvimento de uma metodologia para determinação dos "nós fracos" (do ponto de vista da tensão) do sistema, de maneira a determinar a mínima alocação de suporte reativo necessário [32].
- a utilização do método de projeção ortogonal para correção das violações nas magnitudes de tensão dentro do processo de convergência do fluxo de potência.
- O estudo de uma metodologia para o cálculo dos fatores de ponderação com base nas sensibilidades das variáveis dependentes com relação as variáveis de controle.

Bibliografia

- [01] SALGADO, R. Optimal Power Flow Solutions Using The Gradient Projection Method, PhD Thesis, University of Manchester - UMIST, October 1989.
- [02] MAMANDUR, K. R. C.; CHENOWETH, R. D.: "Optimal Control Of Reactive Power Flow For Improvements In Voltage Profiles And For Real Power Loss Minimization", IEEE Trans. on Pas, N 07, pp 3185-3194, July 1981.
- [03] MELIOPOULOS, A. P.; BAKIRTZIS, A. G.: "Corrective Control Computations For Large Power Systems", IEEE Trans. on Pas, N 11 , pp 3598-3604, November 1983.
- [04] BAKIRTZIS, A. G.; MELIOPOULOS, A. P. S.: " Incorporation Of Switching Operations In Power System Corrective Control Computations", IEEE Trans. on Pas, N 3, pp 669-676, August 1987.
- [05] CAVATI, C. R.; PRADA, R. B.: "Redução De Sobrecargas Através De Ações De Chaveamento De Circuitos", 7 CBA - ITA. S. J. Campos-SP, pp 782-788.
- [06] MAMANDUR, K. R. C.: "Emergency Adjustments To VAR Control Variables To Alleviate Over-Voltages, Under-Voltages, And Generator VAR Limit Violations", IEEE Trans. on Pas, N 05, pp 1040-1047, May 1982.
- [07] MELIOPOULOS, A. P. S.; KORACS, R. R.; REPPEN, N. D.; CONTAXIS, G.; BALU, N: "Power Systems Remedial Action Methodology", IEEE Trans. on Pas, N 02 , pp 500-509, May 1988.
- [08] GARZILLO, A.; INNORTA, M.; MARANNINO, P.; MOGNETTI, F.: " How To Supply Appropriate VAR Compensation Programs To The Planning Of An Electric Network By The Solution Of Linear Inequality Systems", pp 788-792.
- [09] SHOULTS, R. R; CHEN, MO-SHING: "Reactive Power Control By Lest Squares Minimization", IEEE Trans. on Pas, N 01, pp 325-334, January/February 1976.

- [10] FARACH, J.; GRADY, W. M.; KELLOGG, S. D.: "A Linearizes Procedure For Voltage Control", Electric Power Systems Research, 18 (1990), pp 11-18.
- [11] CHANG, CHUNG-LIANG; HSU, YUAN-YIH: "Steady-State Security Control Using A Sensitivity-Basead Approach", Electric Power Systems Research, 18 (1990), pp 01-10.
- [12] KIRSCHEN, D. S.; MEETEREN, H. P. V.: "MW / Voltage Control In A Linear Programming Basead Optimal Power Flow", IEEE Trans. on Pas, Vol. 03, N 02, pp 481-489, May 1988.
- [13] STOTT, B; HOBSON, E.: " Power System Security Control Calculations Using Linear Programming, Part II ", IEEE Trans. on Pas, N 05, pp 1721 - 1731, Sept/Oct 1978.
- [14] MAMANDUR, K. R. C.; BERG, G. J.: " Economic Shift In Electric Power Generation With Line Flow Constraints ", IEEE Trans. on Pas, N 05, pp 1618 - 1626, Sept / Oct 1978.
- [15] STOTT, B; ALSAC, O; MONTICELLI, A. J.: " Security Analysis And Optimization", IEEE Trans. on Pas, N 12, pp 1623 - 1644, December 1987.
- [16] CHANG, SHOW-KANG; MARKS, G. E. KENKATO: " Optimal Real-Time Voltage Control", IEEE Trans. on Pas, N 3, pp 750 - 758, August 1990.
- [17] MARIA, G. A.; YUEN, A. H.; FINDLAY, J. A., " Control Variable Adjustment In Load Flows ", IEEE Trans. on Pas, N 3, pp 858 - 864, August 1988.
- [18] FLATABE, N; FOOSNAS, J. A.; BERNTSEN, T. O, " Transformer Tap Setting In Optimal Load Flow ", IEEE Trans. on Pas, N 6, pp 1356 - 1362, June 1985.
- [19] ILIC, M.; STOBART, W. " Development Of A Smart Algorithm For Voltage Monitoring And Control ", IEEE Trans. on Pas, N 4, , pp 1183 - 1193, November 1990.

- [20] FARGHAL, S. A.; ABOU-ELELA, A. A.; AZIZ, M. R. A. " An Efficient Technique For Real-Time Control Of System Voltages And Reactive Power ", *Electric Power Systems Research*, 12(1987), pp 197 - 208.
- [21] EDWIN, K. W.; LEMMER, S. " Central Level Reactive-Power Voltage Control ", *Synposium 39-83 Florence (1983)* 209-03, pp 1 - 6.
- [22] ZABORSZKY, J.; HUANG, G.; LIN, S. Y.: " Control Of Reactive Power And Voltage In Emergencies ", *Synposium 39-83 Florence (1983)* 208-01, pp 1 - 6.
- [23] ROSEN, J.: " The Gradient Projection Method For Nonlinear Programming ", *J. Soc. Indust. Appl. Math.*, pp 181 - 217, March 1960.
- [24] BURCHETT, R. C.; HAPP, H. H.; VIERATH, D. R.; WIRGAU, K. A.: " Developments In Optimal Power Flow ", *IEEE Trans. on PAS*, N 02, pp 406 - 414, February 1982.
- [25] LAWSON, C. L.; HANSON, R. J. Solving Least Squares Problems ", Ed. Prentice HALL, 1974.
- [26] MILLER, ROBERT H.: " Operação De Sistemas De Potência ", Ed. McGraw-Hill, LTDA, 1987.
- [27] MONTICELLI, ALCIR Fluxo De Carga Em Redes De Energia Elétrica, Ed. EDGARD BLUCHER LTDA, 1983.
- [28] FONTES, ADHEMAR BARROS Desenvolvimento E Implementação De Algoritmos Numericamente Estáveis Para Posicionamento De Pólos Por Realimentação De Estados Em Sistemas Lineares Multivariáveis , MSc Dissertação, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Julho 1988.
- [29] COSTA, A. SIMÕES; QUINTANA, V. H.: " An Orthogonal Row Processing Algorithm For Power System Sequential State Estimation ",
- [30] COSTA, A. SIMÕES; SELEME, S; SALGADO, R.: " Equality Constraints In Power System State Estimation Via Orthogonal Row-Processing Techniques ", *Anais do IFAC Symposium on Planning and Operation of Power Systems*, pg

43-49, Rio de Janeiro, julho 1985.

- [31] GULACHENSKI, E.M.; UNDRIL, J.M. : " Sample Power System Data For E.E.I. Research Project On Bulk Power Transmission System Security "
- [32] FERNANDES, R.A.; LANGE, F.; BURCHETT, R.C.; HAPP, H.H.; WIRGAU, K.A.: " Large Scale Reactive Power Planning ", IEEE Trans on Pas, N 05, pp 1083 - 1088, May 1983.

APÊNDICE A

ROTAÇÕES DE GIVENS

A matriz ortogonal Q , a qual triangulariza a matriz de restrições de igualdade N , pode ser definida através do uso de Rotações de Givens. a base teórica destas Transformações Ortogonais, apresentada em [29], é transcrita a seguir.

O algoritmo básico do método de Givens é adequado para o processamento da matriz N por linhas, sendo que sua principal desvantagem frente as reflexões de Householder, está no grande número de operações requeridas. Isto pode ser contornado através do uso da versão rápida de rotações de Givens, cujo melhoramento está na eliminação da raiz quadrada e na redução no número de multiplicações.

Para demonstrar o princípio básico das rotações de Givens, considere a Transformação definida pela equação (2.15) no capítulo 02, isto é,

$$Q \times N^T = \begin{bmatrix} R \\ - \\ \ominus \end{bmatrix} \quad (A.01)$$

onde todos os termos já foram previamente descritos.

Em adição, suponha que qualquer linha das matrizes N^T e R possam ser representadas pelos vetores \underline{a} e \underline{r} , respectivamente, isto é,

$$\underline{a} = \begin{bmatrix} 0 \dots 0 & a_1 \dots a_k \dots a_n \end{bmatrix}$$
$$\underline{r} = \begin{bmatrix} 0 \dots 0 & r_1 \dots r_k \dots r_n \end{bmatrix} \quad (A.2)$$

A cada passo do método de Givens, uma rotação do plano entre \underline{r} e \underline{a} é realizada de modo que o i -ésimo elemento de \underline{a} seja anulado. Após esta transformação, os vetores linha podem ser expressos como,

$$\underline{a}' = \begin{bmatrix} 0 \dots 0 & 0 & \dots & a'_k \dots a'_n \end{bmatrix}$$

$$\underline{r}' = \begin{bmatrix} 0 \dots 0 & r'_i \dots r'_k \dots r'_n \end{bmatrix}$$

com a rotação definida por :

$$\begin{bmatrix} c & s \\ -s & c \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \underline{r} \\ \underline{a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{r}' \\ \underline{a}' \end{bmatrix} \quad (A.3)$$

onde $c^2 + s^2 = 1$.

Os escalares "c" e "s" são expressos de maneira que

$$c = \frac{r_i}{[r_i^2 + a_i^2]^{1/2}} \quad e \quad s = \frac{a_i}{[r_i^2 + a_i^2]^{1/2}}$$

A versão modificada do método de Givens, consiste basicamente na decomposição da matriz triangular superior R no produto

$$R = D^{1/2} \times \bar{R} \quad (A.4)$$

onde

$D^{1/2}$ é a matriz diagonal de ordem (n, n),

\bar{R} é uma matriz triangular superior de ordem (n , n) cujos elementos diagonais são iguais a unidade.

Os vetores a serem rotacionados podem, portanto, ser expressos como :

$$\underline{a} = \begin{bmatrix} 0 \dots 0 & (W)^{1/2} a_i \dots (W)^{1/2} a_k \dots (W)^{1/2} a_n \end{bmatrix}$$

$$\underline{r} = \begin{bmatrix} 0 \dots 0 & (d)^{1/2} \dots (d)^{1/2} \bar{r}_k \dots (d)^{1/2} \bar{r}_n \end{bmatrix}$$

os quais após a rotação podem ser expressos como :

$$\underline{a}' = \begin{bmatrix} 0 \dots 0 & 0 & \dots (W')^{1/2} a'_k \dots (W')^{1/2} a'_n \end{bmatrix}$$

$$\underline{r}' = \begin{bmatrix} 0 \dots 0 & (d')^{1/2} \dots (d')^{1/2} \bar{r}'_k \dots (d')^{1/2} \bar{r}'_n \end{bmatrix}$$

onde,

$$d' = d + a_i^2$$

$$W' = d \cdot W / d'$$

$$\bar{c} = d / d'$$

$$\bar{s} = W \cdot a_i / d'$$

$$a'_k = a_k - a_i \times \bar{r}_k, \text{ sendo } k = i + 1, \dots, n$$

$$\bar{r}'_k = \bar{c} \times \bar{r}_k + \bar{s} \times a_k, \text{ sendo } k = i + 1, \dots, n$$

Deve ser observado, que somente "d" e não "(d)^{1/2}" é avaliado para executar a rotação de plano. A última equação é a que define a versão sem raiz quadrada do método de Givens.

APÊNDICE B

FORMULAÇÃO ALTERNATIVA PARA O DESPACHO POTÊNCIA REATIVA

Neste caso, o problema é formulado como um problema de despacho de potência reativa, onde o objetivo é a determinação do vetor de incrementos na potência reativa de geração de mínima norma Euclidiana, o qual elimina as violações nas magnitudes de tensão.

Esta formulação está baseada nas equações linearizadas do fluxo de potência, onde as variáveis incrementais podem ser expressas como :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_s \\ \Delta P_{PV} \\ \Delta P_{PQ} \\ \Delta Q_s \\ \Delta Q_{PV} \\ \Delta Q_{PQ} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \underline{H}_{s,PV} & \underline{H}_{s,PQ} & \underline{N}_{s,s} & \underline{N}_{s,PV} & \underline{N}_{s,PQ} \\ \underline{H}_{PV,PV} & \underline{H}_{PV,PQ} & \underline{N}_{PV,s} & \underline{N}_{PV,PV} & \underline{N}_{PV,PQ} \\ \underline{H}_{PQ,PV} & \underline{H}_{PQ,PQ} & \underline{N}_{PQ,s} & \underline{N}_{PQ,PV} & \underline{N}_{PQ,PQ} \\ \underline{J}_{s,PV} & \underline{J}_{s,PQ} & \underline{L}_{s,s} & \underline{L}_{s,PV} & \underline{L}_{s,PQ} \\ \underline{J}_{PV,PV} & \underline{J}_{PV,PQ} & \underline{L}_{PV,s} & \underline{L}_{PV,PV} & \underline{L}_{PV,PQ} \\ \underline{J}_{PQ,PV} & \underline{J}_{PQ,PQ} & \underline{L}_{PQ,s} & \underline{L}_{PQ,PV} & \underline{L}_{PQ,PQ} \end{bmatrix}}_{\downarrow \text{JFP}} \times \begin{bmatrix} \Delta \theta_{PV} \\ \Delta \theta_{PQ} \\ \Delta V_s \\ \Delta V_{PV} \\ \Delta V_{PQ} \end{bmatrix} \quad (B.1)$$

onde, JFP é a matriz de ordem $[N \times (N - 1)]$ composta pelas derivadas das equações da rede elétrica com respeito a magnitude de tensão e ângulo de tensão das barras, avaliada no ponto de operação corrente, sendo N o numero total de barras do sistema,

s, PV e PQ são os índices correspondentes a barra de folga, PV e PQ , respectivamente,

ΔP e ΔQ representam os incrementos de potência ativa e reativa, respectivamente,

ΔV e $\Delta \theta$ representam os incrementos das magnitudes e ângulos das tensões, respectivamente,

$H = \partial P / \partial \theta$ é a submatriz de derivadas da injeção de potência ativa com respeito aos ângulos de tensão das barras,

$N = \partial P / \partial V$ é a submatriz de derivadas da injeção de potência ativa com respeito as magnitudes de tensão das barras,

$J = \partial Q / \partial \theta$ é a submatriz de derivadas da injeção de potência reativa com respeito aos ângulos de tensão das barras,

$L = \partial Q / \partial V$ é a submatriz de derivadas da injeção de potência reativa com respeito as magnitudes de tensão das barras.

Devido ao forte acoplamento entre a magnitude da tensão / potência reativa e a natureza do problema a ser resolvido (eliminação das violações nas magnitudes de tensão do sistema), considera-se que :

- A injeção de potência ativa, exceto para barra de folga, permanece constante, ou seja, $\Delta P_{PV} = 0$ e $\Delta P_{PQ} = 0$.
- A potência reativa das barras de carga permanece constante, isto é, $\Delta Q_{PQ} = 0$

Desta maneira, a equação (A.1) pode agora ser expressa como :

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta_{PV} \\ \Delta \theta_{PQ} \\ \Delta V_s \\ \Delta V_{PV} \\ \Delta V_{PQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{LF} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta Q_s \\ \Delta Q_{PV} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (B.2)$$

onde,

$\left[J'_{LF} \right]^{-1}$ é a matriz J_{FP} sem a sua primeira linha.

O incremento de potência ativa correspondente a barra de folga, pode ser expresso como:

$$\Delta P_s = \underline{h} \times \begin{bmatrix} \Delta \theta_{PV} \\ \Delta \theta_{PQ} \\ \Delta V_s \\ \Delta V_{PV} \\ \Delta V_{PQ} \end{bmatrix} \quad (B.3)$$

onde, \underline{h} é o vetor correspondente a primeira linha da matriz J_{FP} .

Substituindo a equação (B.2) em (B.3), obtêm-se a expressão da injeção de potência ativa na barra de folga com relação a potência reativa gerada (ΔQ_G), isto é,

$$\Delta P_s = \underline{h} \times \underbrace{\left[J'_{LF} \right]^{-1}}_{\downarrow S_{SQ}} \times \Delta \underline{Q}_G \quad (B.4)$$

onde, S_{SQ} é o vetor de ordem $[1 \times NG]$, o qual expressa a sensibilidade da barra se folga com respeito aos incrementos nas potências reativas geradas, sendo que NG é o numero de geradores.

Visto que não ocorrem variações na potência ativa das barra PV e não há preocupação com as perdas de potência ativa de transmissão, ΔP_s é

definido como sendo nulo, e portanto a equação (B.4) pode ser vista como uma equação de balanço de potência reativa.

Os incrementos nas magnitudes de tensão das barras com respeito as injeções de potência reativa gerada, podem ser expressos como,

$$\underline{\Delta V} = \underline{Sv_Q} \times \underline{\Delta Q_G} \quad (B.5)$$

onde $\underline{Sv_Q}$ é a parte da matriz $\underline{J_{FP}}$ correspondente as submatrizes L.

O conjunto de restrições de igualdade e desigualdade que define o problema de soluções corretivas é obtido com o auxilio das equações (B.4) e (B.5).

APÊNDICE C

DADOS DO SISTEMA DE 06 BARRAS

Nas Tabelas C.1 e C.2 são apresentados os parametros das linhas de transmissão e dados de barra, respectivamente, relativo ao sistema de 06 barras mostrado na referência [06].

Tabela C.1 - Dados das Linhas de Transmissão do Sistema de 06 Barras

LT's		R	X	SHUNT
Da barra	P/ barra			
1	4	0.0800	0.3700	0.1400D-1
1	6	0.1230	0.5180	0.2000D-1
2	3	0.7230	1.0500	0.0000D+0
2	5	0.2820	0.6400	0.0000D+0
4	3	0.0000	0.1330	0.0000D+0
4	6	0.0970	0.4070	0.1420D-1
6	5	0.0000	0.3000	0.0000D+0
4	0	0.0000	0.0000	0.5000D-2

Tabela C.2 - Dados das Barras do Sistema de 06 Barras

Barra	1	2	3	4	5	6
Tipo	0	1	2	2	2	2
V	1.0000	1.0000	-----	-----	-----	-----
Delta	0.0000	-----	-----	-----	-----	-----
P	-----	0.5000	-0.5500	-----	-0.3000	-0.5000
Q	-----	-----	-0.1300	-----	-0.1800	-0.5000
Qmin	0.3500	0.1000	-----	-----	-----	-----
Qmax	0.6500	0.3500	-----	-----	-----	-----